

Resum

Aquest projecte final de carrera té l'objectiu de realitzar un estudi dels diversos escenaris que poden produir-se després de la ruptura de tubs en un generador de vapor d'una central nuclear com les d'Ascó i Vandellòs. Aquests models de centrals són anomenades PWR, *Pressurized Water Reactor*, degut a que el refrigerant del nucli és d'aigua lleugera a alta pressió.

Per a la simulació dels diferents escenaris s'han utilitzat els models existents de la central nuclear d'Ascó amb el codi de càlcul RELAP5/Mod3.2.

En el cos del document s'analitza un cas base de ruptura d'un tub, i un altre de ruptura múltiple de tubs en un generador de vapor. En aquests dos escenaris es segueixen les Instruccions d'Operació d'Emergència que disposen els operadors de la sala de control de la central nuclear, de manera que s'ha seguit de la forma més similar possible el procediment d'actuació en un cas real.

Dintre del cas base de ruptura d'un tub, s'han analitzat les accions més crítiques que afecten als paràmetres d'estabilitat i seguretat. Aquestes són, per una banda, el refredament del sistema del refrigerant del reactor, mitjançant les vàlvules d'alleujament dels generadors de vapors no afectats. I per l'altra, la disminució de pressió del sistema del refrigerant del reactor, mitjançant la vàlvula de dutxa normal, per tal de minimitzar el cabal a través del tub trencat.

En el cas de ruptura de tubs múltiple, que probabilitíssimament succeeix amb menys freqüència, s'ha realitzat l'anàlisi d'actuació del grup d'operació, amb la hipòtesi de no aturada de les bombes de refrigerant del reactor. Mitjançant aquesta hipòtesi es tracta el cas de ruptura múltiple, realitzant les accions corresponents a una ruptura simple.





Sumari

1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació.....	7
2.3. Requeriments previs.....	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte.....	9
4. DESCRIPCIÓ GENERAL D'UNA CENTRAL NUCLEAR	11
4.1.1. Introducció	11
4.1.2. Combustible.....	14
4.1.3. Barres de control	14
4.1.4. Dissolució de bor	14
4.1.5. Circuit primari	15
4.1.6. Pressionador	15
4.1.7. Circuit secundari.....	15
4.1.8. Circuit de refrigeració o terciari.....	16
4.1.9. Sala de control.....	16
4.1.10. Recàrregues.....	16
5. CARACTERÍSTIQUES GENERALS DEL CODI I ELS MODELS	18
5.1. Descripció del codi de càlcul Relap5/Mod3.2	18
5.2. Descripció del model de planta	19
5.2.1. Introducció	19
5.2.2. Central Nuclear d'Ascó.....	19
6. EL SISTEMA DELS GENERADORS DE VAPOR	24
6.1. Funció dels Generadors de Vapor	24
6.2. Descripció i nodalització existent.....	25
6.3. Modelització del sistema de trencament de tubs	27
7. ELS TRANSITORIS A LES CENTRALS NUCLEARS	31
7.1. Tipus de transitoris	31
7.2. Transitori de Ruptura de Tubs en un GV	32
7.3. Les Instruccions d'Operació d'Emergència (I.O.E.)	33
8. TRANSITORI DE RUPTURA D'UN TUB EN UN GV (SGTR)	35
8.1. Descripció del transitori de SGTR	35



8.2.	Instruccions d'operació d'emergència en un cas de SGTR.....	35
8.3.	Condicions inicials	41
8.4.	Sistemes automatitzats	41
8.4.1.	Control del nivell de RE generadors de vapor.....	41
8.4.2.	Control d'obertura i finalització dutxa del pressionador	44
8.5.	Anàlisi cas base SGTR	45
8.6.	Conclusions de l'anàlisi del ruptura d'un tub.....	56
8.7.	Arxius.....	58
9.	TRANSITORI DE RUPTURA DE 10 TUBS EN UN GV	59
9.1.	Descripció del transitori de 10 tubs	59
9.2.	Condicions inicials	60
9.3.	Anàlisi del cas base de ruptura múltiple de tubs.....	60
9.4.	Anàlisi d'un error en el seguiment de les IOE en una ruptura múltiple.....	67
9.5.	Conclusions del transitori de ruptura de 10 tubs.....	69
9.6.	Arxius.....	70
10.	ANÀlisi DE LA INFLUÈNCIA DEL TEMPS D'INICI DE L'OBERTURA DE LES DUTXES DEL PRESSIONADOR EN UN SGTR	71
10.1.	Introducció	71
10.2.	Descripció de l'escenari.....	71
10.3.	Hipòtesis	72
10.4.	Anàlisi de les seqüències	72
10.5.	Conclusions del temps d'actuació de les dutxes	80
10.6.	Arxius.....	81
11.	ANÀlisi DE LA INFLUÈNCIA DELS TEMPS D'ATURADA DE LA INJECCIÓ DE SEGURETAT EN UN SGTR	83
11.1.	Introducció	83
11.2.	Descripció de l'escenari.....	83
11.3.	Hipòtesis	83
11.4.	Anàlisi de les seqüències	84
11.5.	Conclusions del temps de finalització de la IS.....	90
11.6.	Arxius.....	91
12.	CONCLUSIONS	93
13.	AGRAÏMENTS	95
14.	BIBLIOGRAFIA.....	97



1. Glossari

AAA	=	Aigua d'alimentació auxiliar.
AAP	=	Aigua d'alimentació principal.
ANAV	=	Associació Nuclear Ascó Vandellòs.
BOL	=	Begining of life.
C.N.	=	Central Nuclear.
CNA	=	CNA I i CNA II.
CNA I	=	Central Nuclear d'Ascó I.
CNA II	=	Central Nuclear d'Ascó II.
CSN	=	Consejo de Seguridad Nuclear.
CNV II	=	Central Nuclear de Vandellòs II.
CVCS	=	Sistema de control químic i volumètric del refrigerant del primari.
ENRESA	=	Empresa Nacional de Residuos.
EOL	=	End of life.
ETSEIB	=	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
GET	=	Grup d'Estudis Termohidràulics.
GV	=	Generador de vapor.
Input	=	Fitxer d'entrada de dades, conté el model.
MOL	=	Middle of life.
OP	=	Transitori d'operació.
OPDT	=	Over pressure diferencial temperature.



OTDT	=	Over temperature diferencial temperature.
Output	=	Fitxer de sortida de dades.
PFC	=	Projecte final de carrera.
PLS	=	Precautions, limitations and setpoints.
PWR	=	Reactor d'aigua a pressió.
PZR	=	Pressionador.
Restart	=	Fitxer de recuperació de dades.
RCS	=	Reactor Coolant System. Sistema de refrigeració del reactor
Relap5/Mod3.2	=	Versió 3.2 de la família de codis de càlcul Relap 5.
SCRAM	=	Aturada brusca del reactor per inserció manual o automàtica de les barres de control.
SEN	=	Secció d'Enginyeria Nuclear.
SGTR	=	Steam Generator Tube Rupture.
SI	=	Sistema Internacional, referit a unitats.
Trip	=	Variable lògica utilitzada en els codis de càlcul Relap5.
UPC	=	Universitat Politècnica de Catalunya.
VB 6.0	=	Llenguatge de programació <i>Visual Basic</i> versió 6.0.



2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

L'origen d'aquest projecte de Final de Carrera es troba en una proposta d'una de les línies d'investigació del Grup d'Estudis Termohidràulics del Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la UPC, en conveni amb les centrals nuclears d'Ascó i Vandellòs II.

2.2. Motivació

La seguretat de les centrals nuclears és un dels aspectes que més interessen a nivell d'explotació de les mateixes i a la societat. Degut a aquest interès és necessari l'anàlisi exhaustiu d'escenaris hipotètics, per tal de saber com actuar en cas de produir-se. Un d'aquest escenaris és el de ruptura de tubs en un generador de vapor, aquest transitori no ha ocorregut mai en cap de les tres plantes de l'Associació Nuclear Ascó Vandellòs II (ANAV) però si en d'altres centrals nuclears de reactors d'aigua a pressió (PWR), i per tant desperta un gran interès.

2.3. Requeriments previs

Per a la realització d'aquest projecte final de carrera, foren necessàries unes sessions teòriques d'introducció a l'energia nuclear, centrades en el funcionament de les centrals nuclears; degut a que jo he cursat la carrera d'Enginyeria Química.

A més a més vaig assistir a la setmana de l'energia nuclear organitzada per la plataforma *b_tec* dintre del programa *b_tec Energy Summer Courses* realitzat l'estiu de 2006.



3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu el projecte és determinar quins són els paràmetres crítics més importants en un transitori de ruptura de tubs d'un generador de vapor en una central nuclear d'aigua a pressió.

Les operacions que es duren a terme segueixen les Instruccions d'Operació d'Emergència (IOE) que conduiran la planta a estats no crítics allunyats de la inestabilitat.

A partir d'aquestes instruccions es realitzaran anàlisis de sensibilitat de diversos paràmetres tals com els temps d'actuació i finalització de les dutxes del pressonador o de la injecció de seguretat.

També s'analitzen les diferències amb el cas de ruptura múltiple de tubs, i l'estudi de les accions que duen a condicions d'estabilitat.

3.2. Abast del projecte

Aquest projecte parteix del model de configuració actual de la central nuclear d'Ascó i pretén simular la reacció d'aquesta a un escenari concret. L'estudi aquí presentat té la intenció de continuar i d'enriquir la biblioteca d'arxius de transitoris que es duen a terme en la Secció d'Enginyeria Nuclear.





4. Descripció general d'una central nuclear

4.1.1. Introducció

La finalitat d'una central nuclear és la de produir energia elèctrica i contribuir a afavorir el benestar i el desenvolupament de la societat. Una central nuclear és una instal·lació que aprofita la calor originada durant el procés de fissió de l'àtom d'urani 235 per produir vapor d'aigua a alta temperatura. Aquest vapor acciona un grup turbina – alternador, generant energia elèctrica, que posteriorment es distribueix per la xarxa elèctrica.

La diferència essencial amb les centrals tèrmiques convencionals és la font de calor utilitzada per a la generació de vapor. En centrals nuclears com Ascó i Vandellòs II, la font de calor és la fissió dels àtoms d'urani 235 continguts en el combustible del reactor. A les centrals tèrmiques convencionals, la calor s'obté per mitjà de la combustió de fueloil, carbó o gas en una caldera.

A continuació s'exposa la descripció general d'una central nuclear com la d'Ascó, objecte d'estudi d'aquest projecte i equipada amb un reactor d'aigua a pressió, també anomenat PWR.

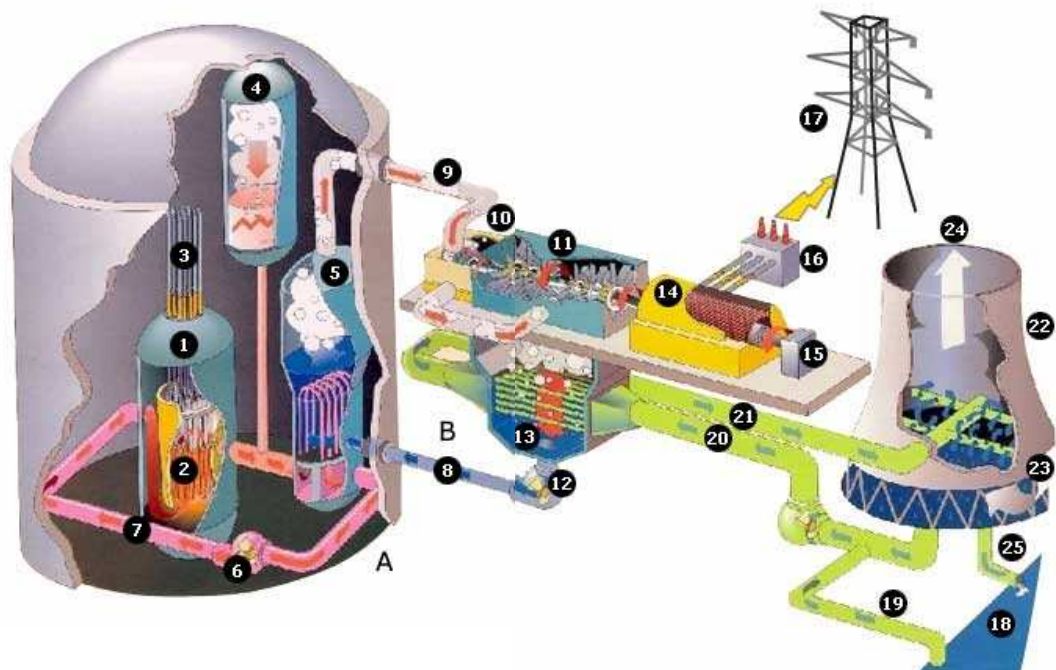


Figura 4-1: Esquema central nuclear PWR



A continuació s'anomenen les principals parts representades en l'esquema anterior, amb la seva numeració corresponent:

A	Circuit Primari	12	Condensador
B	Circuit Secundari	13	Bomba Aigua Alimentació
C	Circuit terciari	14	Alternador
1	Reactor	15	Grup d'excitació
2	Beines de Combustible	16	Transformador
3	Barres de Control	17	Línia d'alt voltatge
4	Pressionador	18	Riu
5	Generador de Vapor	19	Entrada aigua refrigeració
6	Bomba Refrigerant Reactor	20	Aigua freda de refrigeració
7	Aigua alimentació primari	21	Aigua calenta
8	Aigua alimentació secundari	22	Torre de refrigeració
9	Circuit de vapor	23	Flux aire ascendent
10	Turbina d'alta pressió	24	Vapor d'aigua
11	Turbina de baixa pressió	25	Sortida aire refrigeració
12	Condensador		



4.1.2. Combustible

El combustible utilitzat està constituït aproximadament per 75 tones d'òxid d'urani enriquit amb U-235, en una proporció propera al 4,5%.

L'òxid d'urani es presenta en forma de pastilles cilíndriques apilades al interior d'uns tubs o beines d'aliatge metàl·lic de zirconi d'uns 4 metres de longitud formant barres. Aquestes barres s'agrupen alhora en feixos quadrats de 264 unitats, anomenats elements combustibles.

Un reactor ple, conté al interior del vas 157 d'aquests elements combustibles.

La fissió dels nuclis d'urani 235 provocada per l'absorció d'un neutró exterior, produeix dos nuclis més petits (productes de fissió), 2 o 3 neutrons i allibera una gran quantitat d'energia en forma de calor. Un d'aquests neutrons alliberats provocarà una nova fissió quan sigui absorbit per un altre nucli de U-235, produint-se així una reacció en cadena.

4.1.3. Barres de control

Per tal de regular el nombre de fissions i, per tant, la producció d'energia, s'introdueixen en el reactor elements que absorbeixen neutrons. Un d'aquests elements són les barres de control, de les quals n'hi ha 48 conjunts, repartits al nucli amb 24 barres a cada conjunt. La funció de les barres de control és regular la producció d'energia i aturar el reactor en les situacions que sigui necessari.

Aquestes barres estan conformades per materials absorbents de neutrons, pel que, a mesura que s'introdueixen, absorbeixen més neutrons, i provoquen una disminució en el nombre de fissions. En canvi, quan s'extreuen, produeixen l'efecte contrari. Una introducció sobtada i suficient d'aquestes barres atura la reacció de fissió.

4.1.4. Dissolució de bor

Les barres de control constitueixen un element de regulació de la reacció en les situacions en les que es fa necessària una resposta ràpida del sistema, però en situacions nominals es fa necessària la presència constant d'un element que absorbeixi els neutrons sobrers resultants de cada fissió i que no seran utilitzats per a produir-ne una de nova. Aquesta funció és realitzada per una dissolució de bor en l'element refrigerant.

Les barres i la dissolució de bor són autosuficients, de manera independent, per cobrir la funció de control, engegada i aturada del reactor.



4.1.5. Circuit primari

La funció del circuit primari és la de transportar la calor produïda en el reactor cap al circuit secundari a més de contenir de manera estanca els elements que es troben en contacte amb el combustible. El circuit primari està format per tres llaços independents, units al vas del reactor, cada un dels quals incorpora un generador de vapor i una bomba principal. En cada un d'aquests llaços, tots els elements estan units per una canonada principal formant un conjunt tancat completament estanc.

Conceptualment podem dividir cada llaç en dos: la branca calenta i la freda. La branca calenta transporta l'element refrigerant i la calor produïda en el nucli fins al generador de vapor on es cedeix aquesta calor al circuit secundari. La branca freda retorna l'element refrigerant al nucli per començar de nou aquest procés continu.

4.1.6. Pressionador

L'element refrigerant, per a una òptima extracció de calor dels elements de combustible del nucli, ha de mantenir-se líquid mentre es troba en contacte amb aquests. Aconseguir la seva líquescència a altes temperatures exigeix també una alta pressió. És per això que aquest tipus de centrals elèctriques s'anomenen PWR .

El pressionador, connectat a un dels llaços del primari, és un recipient de gran volum que manté la pressió del circuit primari i en regular les variacions, mantenint, per vasos comunicants, els valors de pressió requerits per a l'òptim funcionament del procés mitjançant un sistema combinat d'escalfadors elèctrics i ruixadors d'aigua freda.

4.1.7. Circuit secundari

La funció del circuit secundari és la generació d'electricitat i en això no es diferencia d'una central convencional. En cada un dels tres generadors de vapor, la calor cedida per l'aigua del circuit primari, que circula pel interior de cada un dels múltiples tubs de què es compona el generador de vapor, escalfarà l'aigua que circula per la part exterior i en produirà la seva evaporació.

El vapor generat es dirigeix cap a la turbina per posar-la en moviment arrossegant l'alternador instal·lat al seu mateix eix, que al girar produeix electricitat.



4.1.8. Circuit de refrigeració o terciari

Les centrals nuclears, igual que les altres centrals convencionals i que qualsevol motor o màquina tèrmica, necessita d'un circuit de refrigeració per evacuar la calor no utilitzable, conseqüència del rendiment de qualsevol instal·lació.

Les dues unitats d'Ascó utilitzen com a font de refrigeració l'aigua del riu Ebre en un circuit terciari independent dels circuits primari i secundari. L'aigua és dirigida cap al condensador que es troba a la sortida de la turbina, per liquar, a través dels seus tubs, el vapor expansionat que ha servit per fer-la girar. Un cop finalitzat el recorregut dels tubs del condensador, el total de l'aigua utilitzada es retorna al riu, complint els criteris ambientals regulats per tal de minimitzar la influència en l'entorn.

A les unitats de la C. N. Ascó l'aigua es pren del riu i addicionalment es disposa, entre el condensador i la descàrrega, de 2 bateries en paral·lel de torres de refrigeració de tiratge forçat i una torre de refrigeració de tiratge natural amb una alçada de 160 m, que actuen quan el descens del cabal del riu ho imposa amb la finalitat d'assegurar que la temperatura de l'aigua descarregada respecti el límit autoritzat.

Un emplaçament marítim dona la seguretat de disposar d'una font d'aigua inesgotable. En el cas que la font sigui el riu, el condicionant del cabal se soluciona amb la construcció de les torres de refrigeració.

4.1.9. Sala de control

La sala de control constitueix el centre neuràlgic de totes les operacions de la central, a ella arriben els senyals i els controls de funcionament dels equips i dels sistemes que la constitueixen. És també on se situen els indicadors, els registradors i els comandaments dels diversos equips i sistemes de la central. El procés de tractament i codificació de les ordres emeses i de les informacions generades es duu a terme d'una manera altament automatitzada, amb la col·laboració de l'ordinador de procés i sota el comandament i el control dels operadors.

4.1.10. Recàrregues

Com en qualsevol instal·lació de producció d'energia elèctrica que utilitza combustible, es fa necessària la reposició del combustible gastat per un altre nou.

Periòdicament, a les centrals nuclears, es procedeix a la recàrrega del reactor, en la que se



substitueix aproximadament un 40% dels elements combustibles. El combustible gastat, residu d'alta activitat, es manté en una piscina especialment dissenyada per aquesta finalitat, situada dintre de l'edifici de combustible, on s'emmagatzema fins que és retirat per la ENRESA, que s'encarrega d'aquestes activitats en el nostre país.

Aquestes maniobres es realitzen mitjançant una grua que extrau cadascun dels elements del nucli i els diposita en el canal de transferència que comunica - només durant la recàrrega - els edificis de contenció i de combustible, per a ubicar els elements gastats a las piscines de l'esmentat edifici de combustible. Aquesta maniobra es realitza amb els elements submergits en tot moment en aigua borada que serveix tant com a blindatge davant la radiació com de refrigerant dels elements.



5. Característiques generals del Codi i els models

5.1. Descripció del codi de càlcul Relap5/Mod3.2

Tot seguit es realitzarà una breu descripció del codi de càlcul utilitzat per a la simulació dels transitoris que formen part de la biblioteca de casos: el Relap5/Mod3.2, que va ser elegit en el seu moment per desenvolupar el model de planta de la CNA.

Relap5/Mod3.2 va ser desenvolupat pel Idaho National Engineering & Environmental Laboratory (INEEL) a petició de la U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Aquest codi va ser creat per calcular les simulacions dels transitoris que es produïen en els reactors d'aigua lleugera.

El programa inclou les sis equacions de conservació (massa, energia i quantitat de moviment), les concentracions de soluts i gasos no condensables. A més, té un format lliure d'entrada de dades, capacitat d'obtenció de gràfics i gran flexibilitat en la simulació de qualsevol sistema termohidràulic.

El codi modela el comportament acoblat del reactor i del sistema de refrigeració en diferents escenaris de transitoris així com el comportament en estat estacionari. El Relap5/Mod3.2 és un codi altament genèric que permet simular una gran varietat de sistemes termodinàmics. Els components del sistema de control i del sistema secundari s'inclouen per modelar els controls de la planta, turbines, condensadors i els sistemes d'aigua d'alimentació del secundari [1].

El codi rep com entrada un fitxer anomenat input que conté la descripció de la central nuclear que es vol estudiar juntament amb les condicions inicials i d'operació. L'arxiu input que descriu la central consta de cinc models: l'hidrodinàmic, el tèrmic, el cinètic, el lògic i el de control. La informació de sortida s'emmagatzema en dos arxius de resultats : arxiu restart i arxiu output.

En el fitxer restart la informació és guardada en llenguatge màquina, i per tant l'usuari no pot accedir de forma directa a les dades. Aquest fitxer conté la informació sobre l'evolució de tots els paràmetres amb el temps. Amb l'ajuda d'un altre programa (strip.exe) es poden extreure els resultats de les variables que ens interessin estudiar en funció del temps i graficar-les amb un programa per a tal funció. Aquest fitxer també permet continuar la simulació a partir de l'instant final o de determinats moments d'un estacionari o transitori calculat anteriorment.

Durant l'execució del codi també s'obté l'arxiu de sortida output. La informació d'aquest arxiu pot ser consultada de forma directa. Un fitxer output comença amb un llistat del fitxer d'entrada



(input). A continuació, hi apareix la *major edit* inicial, seguida de les requerides per l'usuari i les que el codi genera automàticament. Les *minor edits* de les variables demandades per l'usuari s'afegeixen entre les *major edits*. Addicionalment, entre les *major edits* poden aparèixer missatges que avisen de les dificultats que s'han trobat a l'hora d'executar el càlcul.

Una *major edit* conté la informació respecte al progrés del càlcul. Aquesta informació està distribuïda en blocs. Al inici de la *major edit* s'hi troba la informació referent al pas de temps utilitzat, al temps de la CPU, al temps de simulació calculat, etc.

Després dóna l'estat en el que es troben totes les variables lògiques (trip) en el moment en el que s'ha escrit la *major edit*, indicant si el trip és cert o fals.

Seguidament es mostren totes les condicions de tots els volums hidrodinàmics, pressions, fraccions de vapor, temperatures, densitats, velocitats, etc. A continuació hi ha les condicions hidrodinàmiques de les unions, l'estat del model de les estructures de calor i l'estat de les variables de control.

Les *minor edits* són uns llistats on s'hi troba l'estat de les variables demanades prèviament per l'usuari. Aquest llistat s'utilitza per obtenir la informació més important junta i, per tant, facilitar l'anàlisi de resultats.

El fitxer output permet localitzar els errors gramaticals que hi puguin haver en el fitxer input d'entrada i tots aquells que s'hagin produït durant l'execució d'aquest fitxer.

5.2. Descripció del model de planta

5.2.1. Introducció

Tant el model de planta de la Central Nuclear de Vandellòs II com el d'Ascó I-II són revisats constantment amb la finalitat de millorar i ampliar els resultats d'anàlisis obtinguts en les simulacions [2]. A més el GET treballa en la obtenció d'un model de confluència per a les dues centrals nuclears, que actualment estan explotades sota una gestió única. Com a conseqüència, els dos models de planta són molt similars i hi ha poques variacions d'un model a l'altre.

5.2.2. Central Nuclear d'Ascó

Després del procés de millores i ampliacions contínues dels models, desenvolupats per al codi Relap5 / Mod 3.2, la planta de la CNA actualment consta aproximadament del número d'elements que es mostren en la següent taula (Taula 5-1):



<i>Elements</i>	<i>Nombre d'elements</i>
Volums hidrodinàmics	539
Variables de control	1454
Trips variables	219
Trips lògics	431
Taules	241
Variables interactives	117

Taula 5-1: Elements nodalització C.N. Ascó

Tots aquests components formen part d'un input en Relap5/Mod3.2 (arxiu base d'entrada de dades) d'unes 17.000 línies per a la CNA.

El model de planta contempla tot el circuit primari de les centrals i el circuit secundari fins a les vàlvules d'admissió de la turbina. També s'inclouen, sistemes associats als circuits primari i secundari, com:

- Sistema de control químic i de volum (CVCS).
- Injecció de seguretat d'alta pressió.
- Injecció de seguretat de baixa pressió.
- Tancs acumuladors d'àcid bòric.
- Sistemes d'aigua d'alimentació, principal i auxiliar.
- Sistema de descàrrega al condensador (*Steam-Dump*).
- Vàlvules d'alleujament i seguretat del pressionador.
- Tanc d'alleujament del pressionador.
- Vàlvules d'alleujament i seguretat dels generadors de vapor.



El model inclou també:

- Senyals automàtiques d'instrumentació.
- Permissius.
- Sistema de proteccions i aturades de turbina i reactor.
- Sistemes de control.

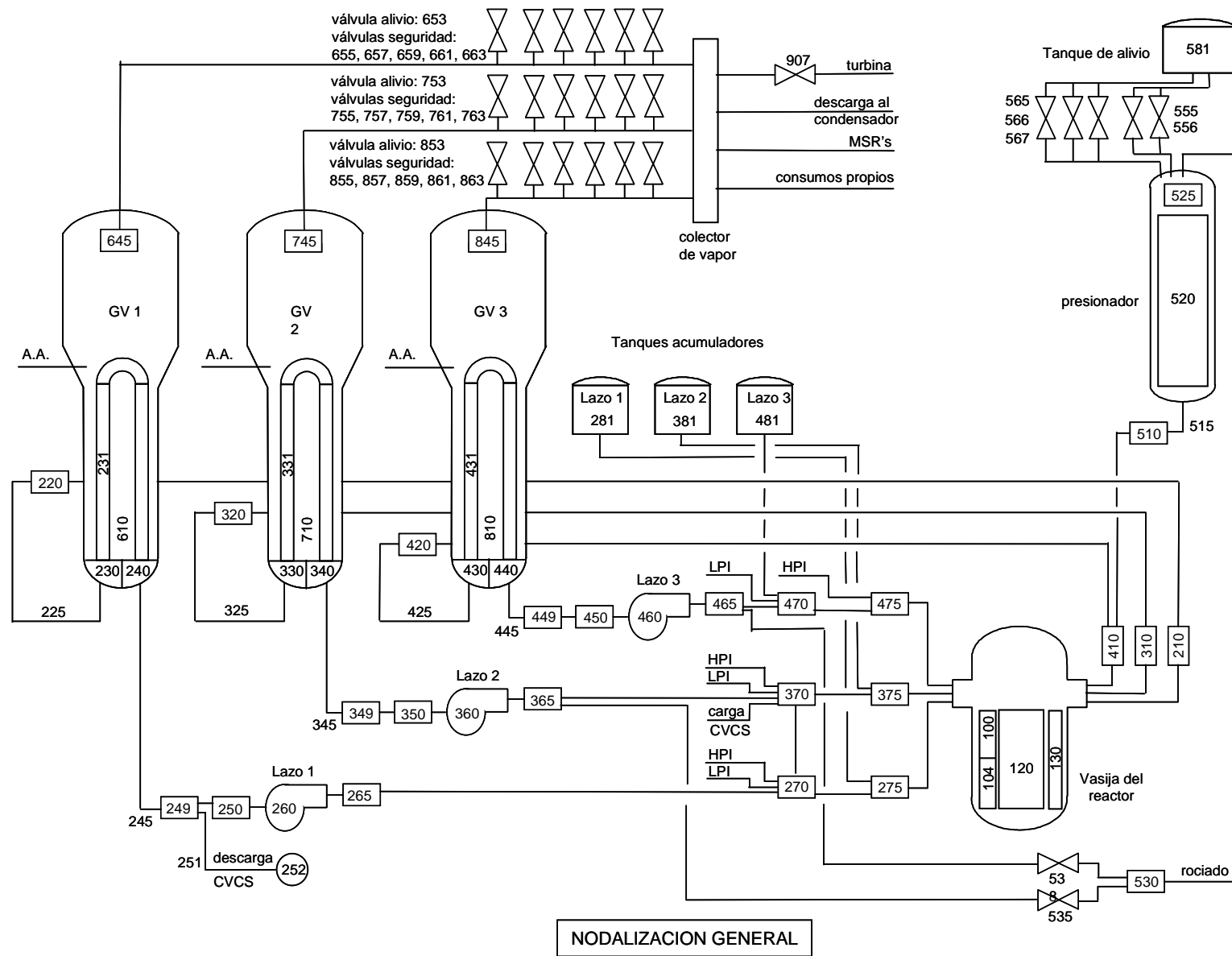
Les limitacions principals del model venen referides a l'ús de la cinètica puntual i dany sever al nucli.

A continuació es mostra el diagrama de nodalització general per a la CNA (Figura 5-1)





Figura 5-1: Nodalizaci3n general C.N. Asc3





6. El sistema dels Generadors de Vapor

6.1. Funció dels Generadors de Vapor

Els generadors de vapor són el *punt d'unió* entre el circuit primari i el secundari. En ells es realitza la transferència de calor del fluid calent pressuritzat que ha passat pel nucli i el cedeixen al secundari, on s'ha d'aconseguir l'ebullició del refrigerant subministrat de forma líquida pels sistemes d'alimentació per tal d'aconseguir vapor d'alta pressió ($40\text{-}60\text{ kg/cm}^2$) que impulsi la turbina.

Constitueixen el focus fred del primari durant l'operació normal, la parada calenta, i la fase inicial de la parada freda, amb diferents entrades d'aigua en cada cas. A més també permeten extreure excessos de calor produïts en el sistema primari en condicions anormals o d'accident mitjançant l'actuació de les vàlvules d'alleujament o de seguretat associades.

A continuació es mostra un GV seccionat de la casa Westinghouse (figura 6-1)

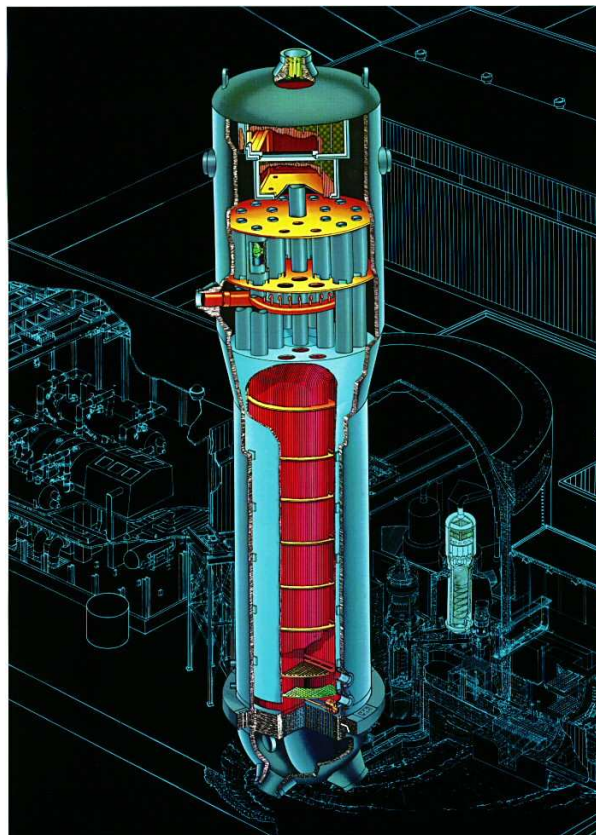


Figura 6-1: Generador de Vapor Westinghouse en 3D



6.2. Descripció i nodalització existent

Els generadors de vapor estan formats per la banda del primari i la del secundari

En la banda del primari està format per un fons semiesfèric, dividit en dues meitats per la placa de partició, i el feix de tubs. Aquest feix consisteix en 5130 tubs en forma de U invertida, amb un diàmetre de 16.87 mm cada un, i que connecten la caixa d'aigües d'entrada amb la de sortida, transferint la calor per les parets dels tubs al fluid del secundari. [2]

En la següent figura (figura 6-2) es mostra l'esquema del primari d'un generador de vapor de la central nuclear d'Ascó, indicant les diferents parts d'aquest.

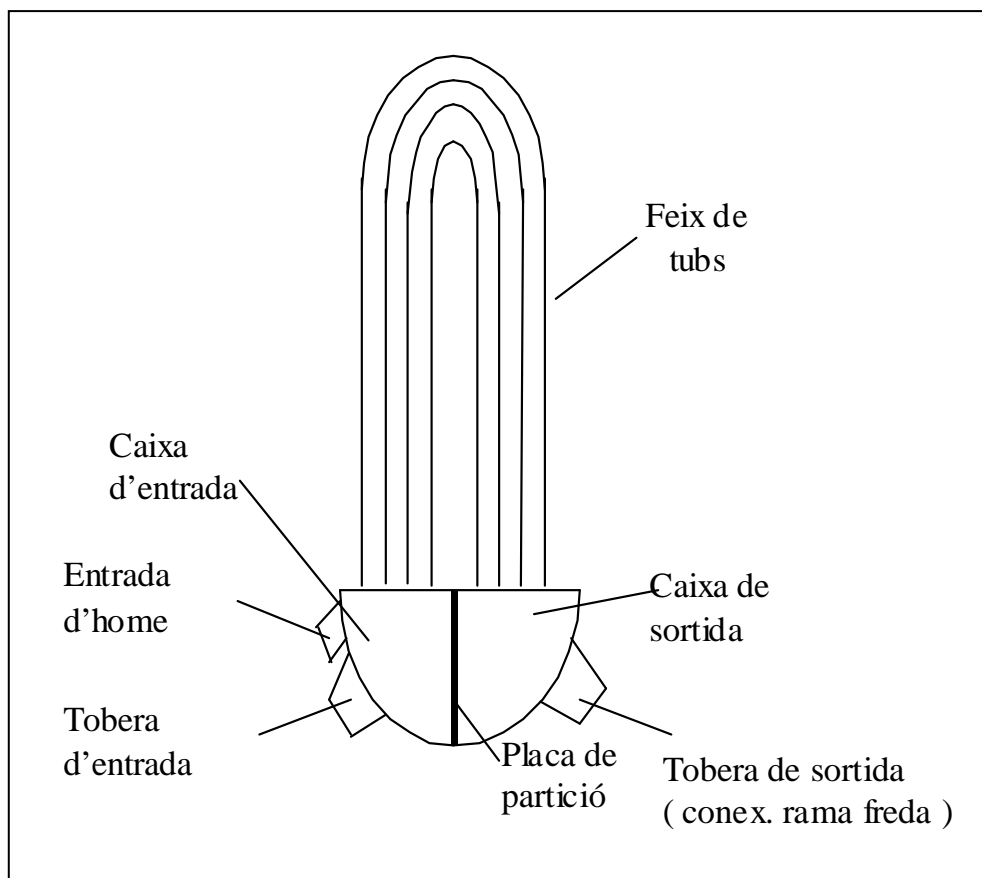


Figura 6-2: Representació esquemàtica GV banda primari



Aquests elements, en el model de planta venen nodalitzats com es mostra a la següent figura per al generador de vapor 1 (figura 6-3). Generador en el que s'aplicarà la ruptura de tubs en l'estudi. De color blau estan senyalades les part del primari

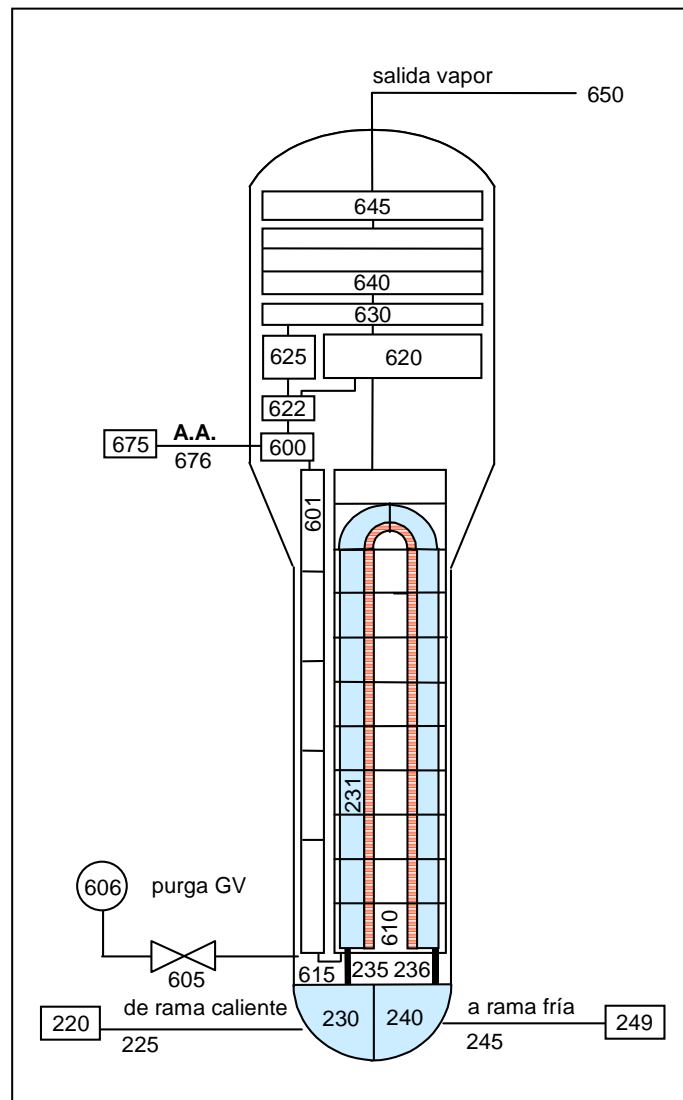


Figura 6-3: Nodalització Generador de Vapor 1

En la figura podem comprovar que tots els tubs del generador estan nodalitzats com un de sol que connecta el volum 230 al 240, amb una àrea de pas equivalent als 5130 tubs. Aquest volums tenen estructures de calor associades, les quals es troben descrites en la secció III de la nota de càlcul de la central nuclear d'Ascó I-II [2]



6.3. Modelització del sistema de trencament de tubs

La ruptura es realitzarà entre el final del tub i la caixa de sortida a la rama freda, que es la zona que presenta més efectes desfavorables des del punt de vista hidrodinàmic.

Per tal de poder simular el trencament, en primer lloc es va haver de crear un tub i un sistema de vàlvules que realitzin el trencament més semblant a una ruptura en doble guillotina.

A continuació es mostra un esquema de la nodalització creada (figura 6-4).

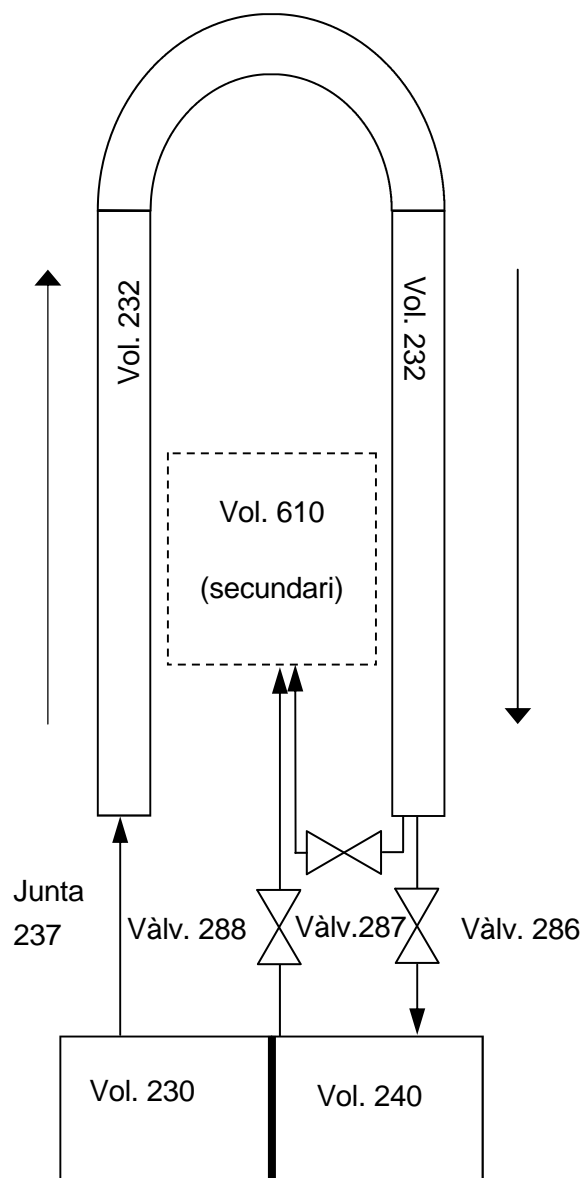


Figura 6-4: Esquema nodalització creada



El tub, que anomenarem 232, s'ha modelitzat amb la mateixa estructura i subvolums que el feix de tubs 231, però amb un diàmetre de 16.87 mm, que és el que correspon a un tub de la instal·lació real.

També se li ha associat una estructura de calor pels càlculs de la transferència de calor entre primari i secundari. L'estructura corresponent al tub simulat és la 1-232, la mateixa la utilitzada en la simulació del feix de tubs modificant l'àrea de transferència de calor i la longitud equivalent de cada subvolum, per a que correspongui a un sol tub.

Per tal de simular la ruptura amb doble guillotina, s'ha creat un sistema de 3 vàlvules fictícies que connecten el tub amb la caixa d'aigües de sortida (vàlv. 286) i dos que connecten el secundari amb el tub i la caixa d'aigües de sortida (vàlv. 287 i vàlv. 288, respectivament). Aquestes vàlvules tenen una àrea de pas de igual valor que el tub, de $2.2359 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

Es mostra a continuació una taula resum dels elements creats (Taula 6-1)

Nom	Element	Funció	Característiques
232	pipe	tub	Format per 20 subvolums de $D=16.87\text{mm}$
237	single junction	junta	No té volum, únicament fa d'ement d'unió
286	trip valve	vàlvula tub-caixa d'aigües	Inicialment unit, es l'element que es trenca
287	trip valve	vàlvula tub-secundari	S'obren en el moment de la ruptura, és la fuga primari-secundari
288	trip valve	vàlvula secundari-caixa d'aigües	

Taula 6-1: Elements creats per a la simulació de SGTR

Per tal de controlar la ruptura s'han simulat les vàlvules com a "*trip valve*". Són per tant, vàlvules que obren instantàniament en el moment que la variable lògica que les controla és certa. La vàlvula 286 està controlada pel trip 206, que es manté oberta fins a l'instant definit per l'usuari.

Les vàlvules 287 i 288 fins al moment de la ruptura estaran tancades i, en el mateix moment que la vàlvula 286 es tanqui, elles s'obriran. Així que s'ha creat el trip 205 que es faci cert en el mateix instant de temps que el 206 sigui fals.

D'aquesta manera hem definit la ruptura. En operació normal, una part del fluid del volum 230 passa pel 237 i recorre el tub creat en forma d'U, transferint calor al secundari, llavors passa per la vàlvula 286 i va aigües avall cap a la branca freda. A partir de l'instant de temps en que els trips realitzin el trencament, i sempre i quan la pressió del primari sigui més alta que la del secundari, continuarà passant pel tub 232, però no arribarà al 240, sinó que a través de la vàlvula 287 passarà al secundari. A més a més el volum aigües avall 240, també estarà en contacte amb el secundari, i per tant també hi haurà un intercanvi de fluid.





7. Els transitoris a les Centrals Nuclears

Un transitori en una instal·lació nuclear és qualsevol variació significativa d'un o més paràmetres importants d'operació, respecte al seu valor nominal estable. Com poden ser temperatures i pressions a diferents punts del sistema, nivell de potència, cabal del refrigerant, etc. Si l'amplitud del transitori es troba dintre dels límits fixats per a l'operació del sistema afectat, els controls automàtics compensen generalment els efectes de la desviació. No obstant, els transitoris més severos solen activar el sistema de protecció del reactor.

7.1. Tipus de transitoris

L'autoritat reguladora americana (NRC) classifica en 4 tipus els possibles transitoris d'una instal·lació nuclear, en funció de la seva freqüència estimada i de les possibles conseqüències radiològiques:

1. Operació normal i transitoris operacionals: Es produeixen regularment en el funcionament a potència, recàrrega, manteniment o maniobres a la central.

Exemples: funcionament estable a potència, variacions de càrrega, posada en marxa, etc.

2. Fallades de freqüència moderada: Fallades amb una freqüència esperada de 1/any aproximadament. En el pitjor dels casos el reactor s'atura, però la central és capaç de tornar a funcionar en breu.

Exemples: pèrdua d'aigua d'alimentació, pèrdua de cabal de refrigerant, caiguda de barres, etc.

3. Fallades infreqüents: Poden provocar danys a una petita fracció del combustible, però suficient per a impedir el funcionament de la central durant un període prolongat. La seva freqüència esperada és d'una vegada en tota la vida de la central.

Exemples: LOCAs petits, trencament de tubs d'un generador de vapor, etc.

4. Fallades limitatives: No s'espera la seva ocurrència durant la vida de la central, però es postulen perquè, en cas de produir-se, podrien provocar l'alliberament de radioactivitat a l'exterior. Per això s'inclouen com a accidents base de disseny.

Exemples: LOCAs grans, trencament de línies de vapor, etc.



En aquest projecte final de carrera, l'estudi que es realitza està troba en l'àmbit de la categoria 3 com a fallada infreqüent.

Aquest incident no ha passat mai en cap de les centrals de l'ANAV, però si n'hi ha hagut a nivell mundial, a continuació es mostra una taula amb els principals incidents de ruptura de tubs en un generador de vapor

Any	Planta	Localització	Cabal de fuga
1975	Point Beach 1	Wisconsin	33 l/min
1976	Surry 2	Virginia	87 l/min
1979	Prairie Island 1	Minnesota	103 l/min
1982	Ginna	Nova York	166 l/min
1987	North Anna 1	Virginia	159 l/min
1989	Mc Guire 1	Carolina del nord	132 l/min
1993	Palo Verde 2	Arizona	63 l/min
2000	Indian Point 2	Nova York	24 l/min

Taula 7-1 : Transitoris reals de ruptura de tubs en un GV

Aquestes dades han estat recopilades per *The virtual nuclear tourist* [3] a partir de les dades públiques del *Licensee Event Reports* (LERs) i són mostrades amb ànim de situar l'escenari de ruptura de tubs, i les dades mostrades no seran usades en la realització de càlculs per aquest PFC..

Cal destacar, que en cap dels casos anomenats hi va haver un perill per a la salut pública ni per la seguretat.

7.2. Transitori de Ruptura de Tubs en un GV

Dintre d'aquesta categoria s'analitzen les ruptures de tubs en un generador de vapor que produeixen un camí directe de alliberació de refrigerant primari al secundari.

L'accident de tubs analitzat es aquell en el que la fuga es equivalent a la d'un accident amb pèrdua de refrigeració molt petita (LOCA molt petit, S3). Aquest cabal de fuga, equival, a C.N. d'Ascó a la ruptura en doble guillotina de aproximadament 1 tub d'un generador de vapor (Segons anàlisi termo-hidràulic realitzat amb el codi RELAP per ANAV

Aquest transitori també s'anomena amb l'acrònim anglosaxó SGTR (*Steam Generator Tube Rupture*).



7.3. Les Instruccions d'Operació d'Emergència (I.O.E.)

Les Instruccions d'Operació d'Emergència (I.O.E.) són els procediments que han de seguir els operadors de la sala de control en cas de que hi hagi algun incident.

L'entrada a les I.O.E. es realitza bàsicament per dues guies específiques:

- E-0 -- Aturada del reactor i/o injecció de seguretat [4]: si en algun moment té lloc o es requereix la aturada del reactor o la injecció de seguretat.
- ECA-0.0 – Pèrdua total de corrent alimentació: si es produeix una pèrdua total d'alimentació a les barres de salvaguardes. Aquesta guia és preferent a qualsevol altra que estigui en execució.

La guia d'ús més freqüent és la E-0, que és la utilitzada en aquest escenari. En ella s'entra pel pas 1, procedint llavors amb les regles d'ús ja descrites, el que suposa dues possibilitats:

Continuar a la guia E-0 i iniciar la vigilància del arbre d'estat a causa d'una instrucció rebuda en un cas, o bé, efectuar una transferència a una altra I.O.E. per seguir els passos que en aquesta hi constin.

La *I.O.E.-E3 Ruptura de tubs en un generador de vapor* [5], inclou les accions necessàries per posar fi a la fuga de refrigerant del reactor al sistema secundari, després d'una ruptura de tubs en un dels generadors de vapor. (en l'apartat 8.2 s'analitzen aquestes operacions d'emergència)

Les I.O.E. no són un llistat d'instruccions en sèrie, sinó que en cada pas la I.O.E. realitza una afirmació (del tipus: dutxa del pressióndor disponible). En cas que sigui afirmativa, es passa al següent apartat; si aquesta afirmació és falsa (la dutxa està espatllada o no arriba l'aigua), llavors la I.O.E. indica que s'ha de fer o a quin pas s'ha d'anar. Així que, un cop s'entra en les I.O.E. l'operador ha d'anar llegint els passos, comprovar en la sala de control els indicadors, i realitzar les accions descrites. A més, les I.O.E. tenen una pàgina desplegable en la que hi ha els paràmetres que s'han de controlar durant tota la instrucció, i en cas necessari, realitzar les accions especificades davant de qualsevol altra.

Les I.O.E. no poden ser mostrades en aquest PFC degut a que són propietat de ANAV i considerat material confidencial.





8. Transitori de ruptura d'un tub en un GV (SGTR)

8.1. Descripció del transitori de SGTR

Quan es produeix una ruptura de tubs d'un generador de vapor, el cabal de fuga que no es capaç de ser reemplaçat pel sistema normal de càrrega, origina una disminució de nivell i pressió en el pressuritzador. L'aturada del reactor es produirà al arribar al punt de tarat de ΔT de sobretemperatura o quan s'arribi a la pressió de 137 Kg/cm^2 . Aquesta aturada del reactor origina l'activació del sistema Steam-dump per tal de descarregar una part del vapor al condensador.

També es produeix l'aïllament de l'aigua d'alimentació principal, com a conseqüència de la baixa temperatura mitja del sistema primari després de l'aturada del reactor. I l'arrencada automàtica del sistema d'aigua d'alimentació auxiliar.

Quan la pressió baixa fins a 130 Kg/cm^2 , corresponent a la actuació de la injecció de seguretat, es produirà l'arrencada de la bomba aturada en mode d'injecció d'alta pressió, i si fos necessari de les bombes del sistema d'injecció de baixa pressió.

Els anàlisis que es duren a terme en aquest projecte final de carrera tenen la finalitat d'estudiar el seguiment de les instruccions d'operació d'emergència relatives a aquest transitori.

8.2. Instruccions d'operació d'emergència en un cas de SGTR

Les accions que s'han comentat en l'apartat anterior són realitzades automàticament pels sistemes de control i protecció de la planta, i a més a més succeeixen amb un temps bastant curt des de la ruptura del tub.

El desenvolupament posterior del succés depèn altament de la actuació del grup d'operació, que haurà d'entrar en la IOE-E-0, en el moment en que les senyals els indiquin l'aturada del reactor, i arribar al pas número 23 que els durà a la IOE-E-3 (Ruptura de tubs en un generador de vapor).

La finalitat de seguir aquesta I.O.E. és la de disposar d'algun generador de vapor aïllat del que s'ha produït la ruptura i poder usar aquest com a focus fred, per tal d'utilitzar-lo en la posterior despressurització del secundari per a la refrigeració del primari, que permeti mitjançant la reducció de pressió d'aquest, aturar el cabal de fuga, al igualar la pressió del sistema de



refrigerant del reactor respecte la del generador de vapor afectat.

En cas de realitzar-se satisfactòriament totes les accions descrites, la planta es trobarà en una situació quasi estable, i si no s'ha produït cap camí addicional de fuga de refrigerant primari, es podrà finalitzar la d'injecció de seguretat, establir i controlar els cabals de càrrega i descàrrega normals i igualar les pressions del RCS i GV amb ruptura i realitzar una parada ordenada.

Per tant els passos a realitzar són

- Regular el cabal de l'aigua d'alimentació auxiliar a uns 55 T/h, i obrir les interconnexions. Aquesta és una acció no descrita en les I.O.E., però és una acció habitual en cas de accident per tal de tenir un cabal igual en els tres llaços.
- **IOE E-0 passos 1 al 22:** verificacions bàsiques de seguretat, que en aquest escenari no afecten en cap acció.
- **IOE E-0 pas 23:** Comprovar nivells de radiació en diferents punts.

El programa Relap no està dissenyat per fer càlculs de nivells de radiació, per tant s'ha fet la hipòtesis que es troba un nivell anormal de radiació elevada en les línies de vapor (segons informe de la central nuclear d'Ascó [7]) . Aquest pas ens indica que hi ha una ruptura de tubs en algun generador de vapor, per tant ens fa passar a la I.O.E. E-3: Ruptura de tubs en un generador de vapor.

- **IOE E-3 pas 2:** Identificar GV amb ruptura: hi ha diferents maneres per identificar quin GV té algun tub trencat:
 - Augment inesperat en el nivell de rang estret (RE) d'un GV
 - Cabal d'aigua d'alimentació d'un GV inferior als altres
 - Alta radiació detectada per mitjà de les preses de mostra dels GV
 - Alta radiació en les línies de vapor
- **IOE E-3 pas 3a:** Ajustar tarat de vàlvules d'alleujament (PORV) del GV afectat a 81 kg/cm² (en operació normal està fixat a 78,6 kg/cm²).
- **IOE E-3 pas 3c:** Aïllar cabal de vapor des de GV afectat a la turbobomba d'aigua d'alimentació auxiliar.

En la C.N. d'Ascó duen vapor a la TBAAA els generadors 1 i 3, en aquest escenari hem escollit per a la ruptura el Generador de Vapor 1, per tant hem de realitzar aquest pas.



- **IOE E-3 pas 3d:** Tancar vàlvula d'aïllament de purga del GV afectat
- **IOE E-3 pas 3e:** Tancar vàlvules d'aïllament (MSIV) i *by-pass* de la línia de vapor principal del GV amb ruptura.
- **IOE E-3 pas 4b:** Tallar el cabal d'alimentació al GV amb ruptura.

Quan s'ha realitzat les diverses accions del pas 3 i 4 tenim el secundari del GV afectat totalment aïllat, només pot haver-hi una sortida de fluid per la vàlvula d'aïllament o les vàlvules de seguretat. A més a més tampoc no hi ha cap entrada de fluid extern. L'únic contacte existent és amb el primari a través de la ruptura.

- **IOE E-3 pas 7b:** Controlar cabal d'alimentació per mantenir el cabal de rang estret dels GV intactes entre 29% i 50%

Aquest pas es d'aplicació durant tota la resta del transitori, s'ha d'estar alerta per tal de que el cabal no marxi d'aquest rang.

En les simulació realitzades s'ha creat un controlador per tal de complir aquest pas, sense necessitat de controlar-ho manualment, i d'aquesta manera assegurar-nos que aquest no influeixi en l'estudi de les accions posteriors (mirar apartat 8.4.1)

- **IOE E-3 pas 14:** Iniciar refredament del Sistema del Refrigerant del Reactor (RCS). Alliberar vapor manualment mitjançant les vàlvules d'alleujament (PORV) des del(s) generador(s) de vapor intacte(s) al ritme màxim.

La IOE E-3 incorpora una taula de dades discretes per determinar el final d'aquest pas, s'entra en aquesta taula per la pressió actual del GV amb ruptura, i la taula indica la màxima temperatura de sortida del nucli, per sota de la qual ja es pot aturar el refredament mitjançant les PORVs

Aquest pas no és trivial, ja que la pressió del GV afectat no es manté constant, sinó que va disminuint degut a la disminució de pressió i temperatura del RCS, per tant s'ha d'anar consultant diverses vegades durant l'operació fins arribar a l'instant de temps en que es pot aturar l'alliberament de vapor.

- **IOE E-3 pas 17b:** Disminuir la Pressió del RCS per tal de minimitzar el cabal a través de la ruptura i recuperar nivell en el pressionador. Operar una dutxa del PZR a cabal màxim fins que es compleixi una qualsevol de les següents condicions:



- Nivell del PZR superior a 77%
- Subrefredament del RCS basat en termoparells de sortida del nucli inferior a 0°C
- O bé que es compleixin simultàniament les següents dos condicions:
 - Pressió del RCS inferior a la pressió del GV afectat.
 - Nivell del pressionador superior al 16%

En aquest pas observem que hi ha quatre variables a controlar a partir del moment en que s'obren les dutxes. Per tal d'agilitzar i facilitar la simulació, s'ha creat un controlador que determini el temps en que les dutxes s'han de tancar. (explicació en l'apartat 8.4.2)

- **IOE E-3 pas 21c:** Anar a IOE ES-1.5: Seqüència de reducció de injecció de seguretat en fase de recirculació a branques fredes [6].

Aquesta instrucció inclou les accions necessàries per iniciar la seqüència de reducció de la injecció de seguretat (IS), fins al moment d'establir el cabal de carga, quan el sistema esta alineat en mode de recirculació a branques fredes.

Les accions que s'han de realitzar seguint les instruccions de la IOE ES-1.5 són:

- Aturar un tren d'injecció de seguretat.
- Alinear el segon tren d'injecció de seguretat a l'aspiració de les bombes de càrrega.

Per entendre aquestes instruccions, cal saber que en la C.N. d'Ascó el sistema d'injecció de seguretat i el sistema de càrrega estan impulsats pels mateixos trens d'injecció, de manera que per passar d'un mode de funcionament a l'altre s'han d'alinear en la corresponent sortida. Aquest mode de funcionament és possible ja que el sistema d'injecció de seguretat i el sistema de càrrega mai operen a la vegada.

- **IOE E-3 pas 23:** Establir cabal de càrrega.

Si tots aquests passos es realitzen correctament en el temps apropiat la planta hauria d'estar estable, amb el generador de vapor afectat aïllat, la injecció de seguretat aturada i amb el sistema de càrrega en funcionament.



Per a la realització d'aquestes accions s'ha hagut de definir el temps en que es realitza cada una. Per aquesta tasca es va tenir la col·laboració d'un expert de la central amb el qual es van definir aproximadament els temps que es pot tarda en la sala de control a realitzar cada pas de les IOE, aquest temps estan especificats en la Taula 8-1, on també hi ha els criteris utilitzats.





Taula 8-1: Temps de realització de les accions descrites

		Temps	Accions realitzades / Accions importants automàtiques
Instruccions Operació d'Emergència: IOE-E-3 Ruptura de tubs en un generador de vapor	Acció provocada	60	Ruptura un tub GV1
	Accions de protecció automàtiques	191	Dispar del reactor per OTDT
		192-216	Steam-Dump
		200	Aïllament AAP; inici entrada AAA
		216	Entrada HPI per baixa pressió PZR
	Pas previ	400	pas "lògic" davant un accident, per tal de tenir cabal AAA proper a 55t/h per llaç
		400	Considerem que passa un t=10 min abans d'arribar a entrar en el IOE-E3
	Pas 2	660	Aquest pas no duu cap acció associada deixem 20-30 s per les operacions "més o menys" immediates
	Pas 3a	690	
	Pas 3c	710	
	Pas 3d	740	
	Pas 3e	770	
	Pas 4b	800	
	Pas 7b	900-endavant	Deixem 100s per la realització dels passos 5 i 6
	Pas 14	+200	El temps que deixem es de 6 pasos de comprovacions a 30s cada un.+20s **Quan es compleixen les condicions pas 14a
	Pas 17b	+150	El temps es de 3 comprovacions a 30s + 60 segons de marge **Quan es compleixen les condicions pas 17b
	Pas 17c		
	Pas 21b	+200	5 pasos/comprovacions a 30s + 50 segons de marge
	Pas 22	+30	1 comprovacio a 30s
	Pas 23	+30	1 comprovacio a 30s

8.3. Condicions inicials

Les simulacions comencen després d'un transitori nul de 12.000 segons, i les condicions inicials són les que es mostren en la següent taula (Taula 8-2)

Condicions inicials	
Potència	99,81%
Pressió primari	157,2 kg/cm2 rel
Posició barres de control	Òptima
Sistemes	En operació normal per al nivell de càrrega de plena potència

Taula 8-2: Condicions inicials simulacions

- **ESDEVENIMENT INICIADOR**

t=60s Ruptura d'un tub del generador de vapor 1 entre la sortida del tub i l'entrada de la caixa d'aigües.

8.4. Sistemes automatitzats

8.4.1. Control del nivell de RE generadors de vapor

La IOE E-3 pas 7b indica que s'ha de realitzar un seguiment als nivells de rang estret del generadors de vapor, durant tot el que queda d'operació, per tal de que es mantinguin entre el 29 i 50%, i per una millor operació per sobre del 43%. En la planta no existeix cap controlador per fixar un nivell dels GV, sinó que és un control discret en el qual es va indicant si es vol més cabal o menys.

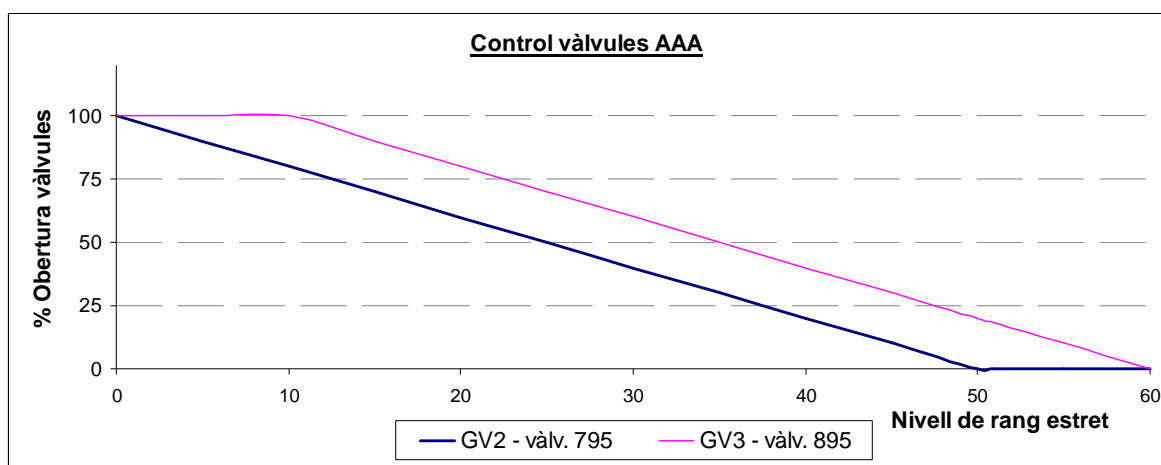
Per tal de realitzar una simulació més àgil i evitar paràmetres que poden confondre a l'estudi de les accions posteriors s'ha optat per crear un control que mantingui en tots els escenaris un nivell en el GV mencionats proper al 50%.



El control del cabal d'aigua d'alimentació auxiliar en el codi de la planta es realitza mitjançant el grau d'obertura de dues vàlvules, la vàlvula 795 corresponent al GV2, controlada per la variable de control 5035, i la vàlvula 895 del GV3 amb la variable 5055. Per tant s'ha implementat un controlador del grau d'obertura d'aquestes inversament proporcional al nivell de rang estret.

En el GV2 aquest control funciona perfectament, però en el GV3 no és útil directament, ja que aquest GV és el que subministra el vapor necessari per al funcionament de la turbobomba d'aigua d'alimentació auxiliar. Per tant té unes necessitats d'alimentació superiors. En concret, s'ha analitzat que el cabal màssic d'AAA necessari per mantenir un nivell de RE del 50% és de 30 T/h, que per a les condicions del moment en que és necessari aquest control (funcionament de 2 motobombes, 1 turbobomba, interconnexions obertes i 1 GV aïllat) correspon a un grau d'obertura de la vàlvula del 20%.

Aplicant aquest diferencial en el grau d'obertura de la vàlvula 895, obtenim: (Gràfic 8-1)

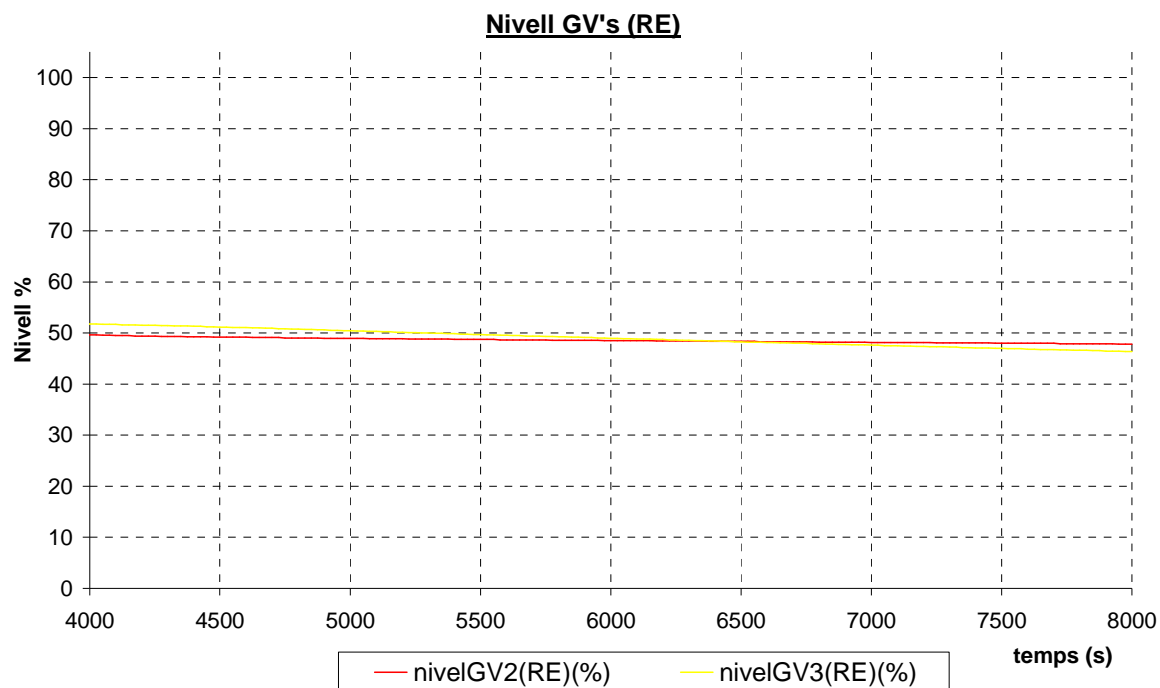


Gràfic 8-1: Control Grau d'obertura vs. Nivell RE

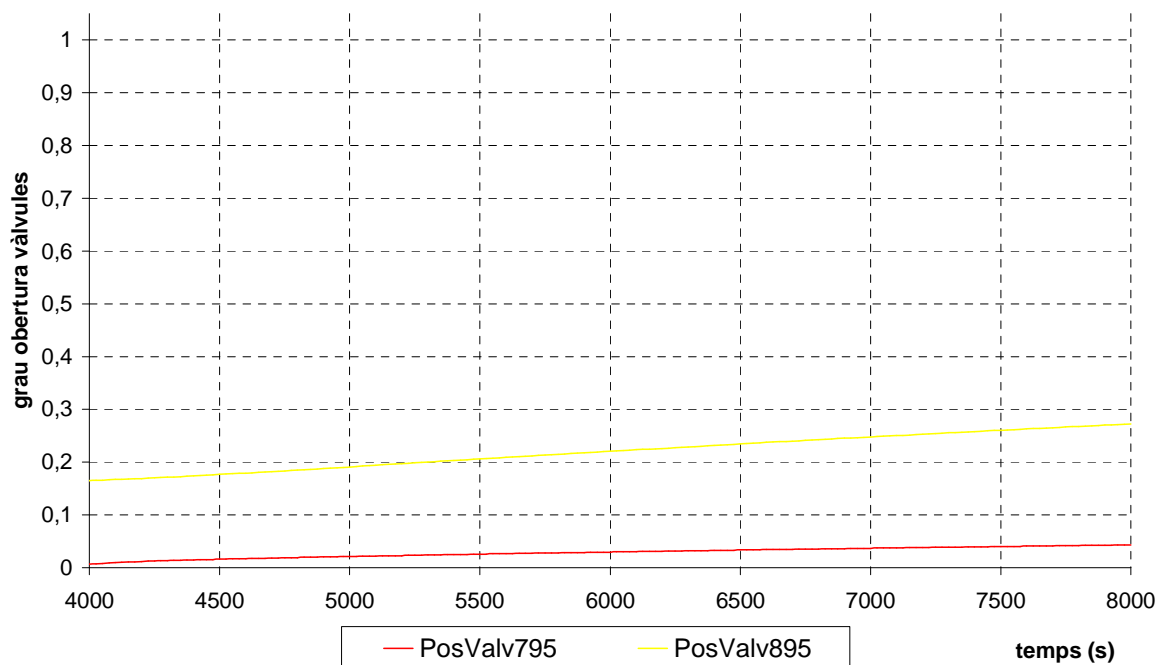
Mitjançant aquest control no es pretén obtenir una resposta immediata de la planta obligant a que els GVs estiguin exactament al 50%, sinó aconseguir una aproximació a aquest valor en estat estacionari. En passos següent a l'ús d'aquest, es provoca una despressurització accelerada els GV que du a una disminució de nivell en ells, i seria il·lògic obligar a mantenir el nivell del 50%.

Observem un exemple del control que exerceix en el cabal d'aigua d'alimentació auxiliar en una de les simulacions, en un instant de temps en que no hi ha cap més acció simultània (Gràfic 8-2 i Gràfic 8-3)





Gràfic 8-2: Exemple control AAA: Nivell RE vs temps



Gràfic 8-3: Exemple control AAA: Grau obertura vs temps

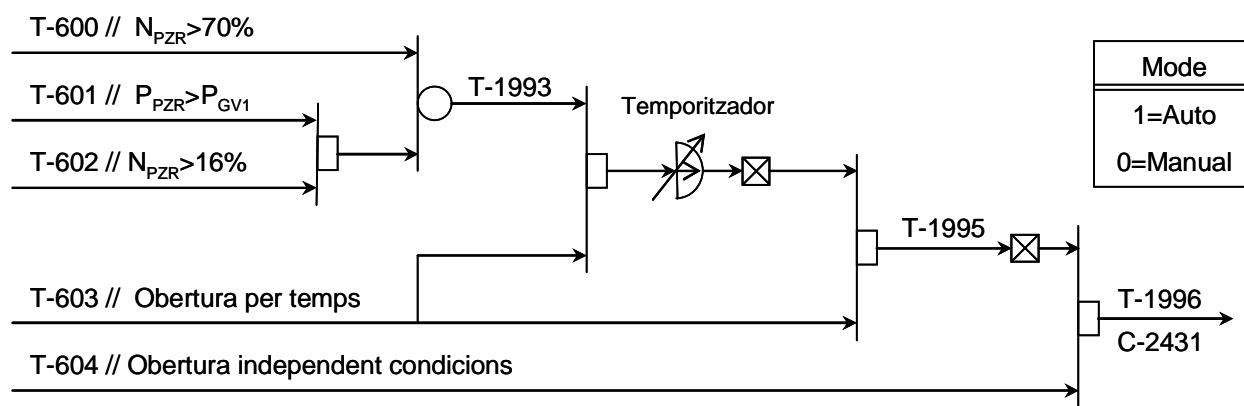


8.4.2. Control d'obertura i finalització dutxa del pressionador

Per tal d'automatitzar el pas 17, s'ha creat una lògica que permeti l'obertura de la dutxa en el moment desitjat, i que aquesta es tanqui quan es compleixin els requisits del pas 17c. Com ja s'ha exposat en l'apartat 7.3, s'ha de complir tres condicions. Una d'elles, que el subrefredament del RCS basat en termoparells de sortida del nucli sigui inferior a 0°C , s'ha comprovat que en cap dels transitoris de trencament d'un tub es compleix, per tant l'hem obviat de la lògica.

Aquesta lògica incorpora una obertura manual, obertura en el temps indicat (automàtica), les tres condicions per ser aturada, i a més, un temporitzador per apagar les dutxes. De manera que un cop s'han complert les condicions es pot deixar el temps desitjat per a que s'apaguin.

Mostrem a continuació la lògica d'aquest control (Il·lustració 8-1):



Il·lustració 8-1: Lògic control dutxa normal pressionador

Segons el codi, les dutxes poden ser operades en mode automàtic, que és quan el control d'elles el té la planta segons els paràmetres establerts, o bé manipulades per l'operador, mode manual, que és quan el trip 1996 és 0.

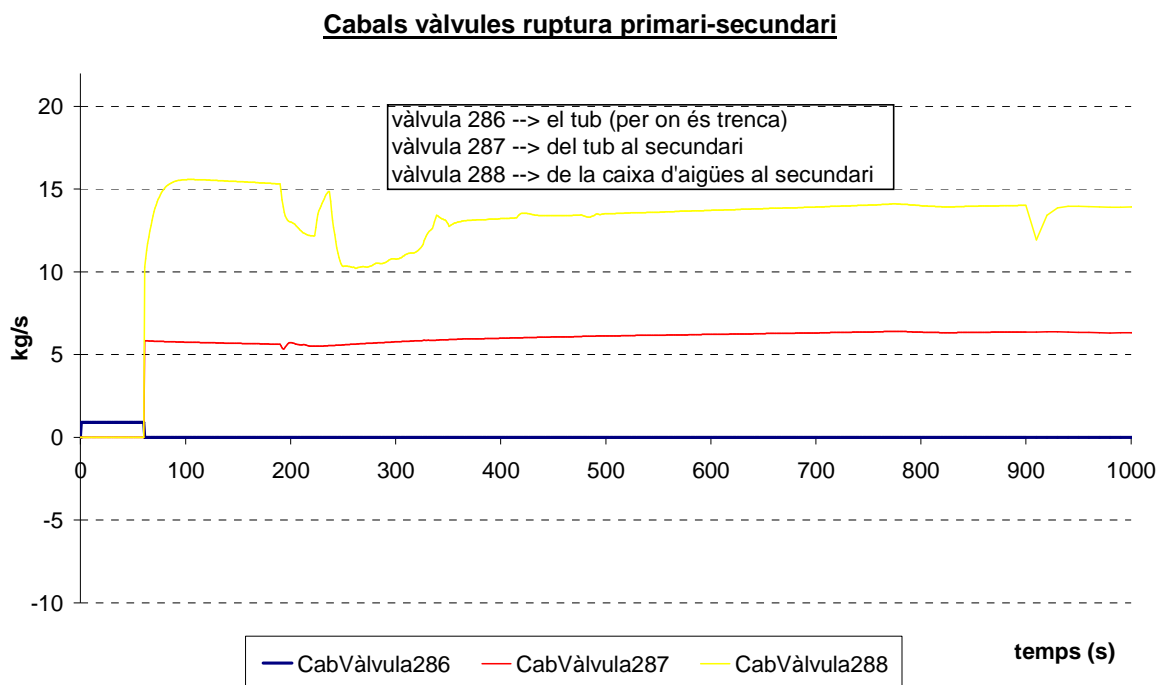
El trip 604, indicat com a obertura independent de les condicions es refereix a que podem obrir les dutxes o tancar-les sense tenir en compte les condicions establertes, per exemple, si volem mantenir les dutxes obertes encara que ja es compleixin les condicions per tancar-les.



8.5. Anàlisi cas base SGTR

Aquest és un escenari amb moltes accions manuals, i l'objecte d'aquest PFC es trobar i analitzar les accions crítiques per dur a terme una aturada ordenada. En primer lloc es realitza l'anàlisi d'un cas que s'ha considerat el cas base, ja que els temps entre accions que s'han usat són els que hipotèticament es tardaria en la sala de control si no hi ha cap contratemps.

Iniciem el transitori amb la ruptura de tubs en doble guillotina en el generador de vapor 1 als 60 s. Llavors, com es pot veure en la següent gràfica (Gràfic 8-4), hi ha dos cabals del primari que passen al secundari, el fluid que passa pel tub i entra al secundari (vàlv. 287) i també el de l'altra banda del tub trencat, el que dona a la caixa d'aigües.

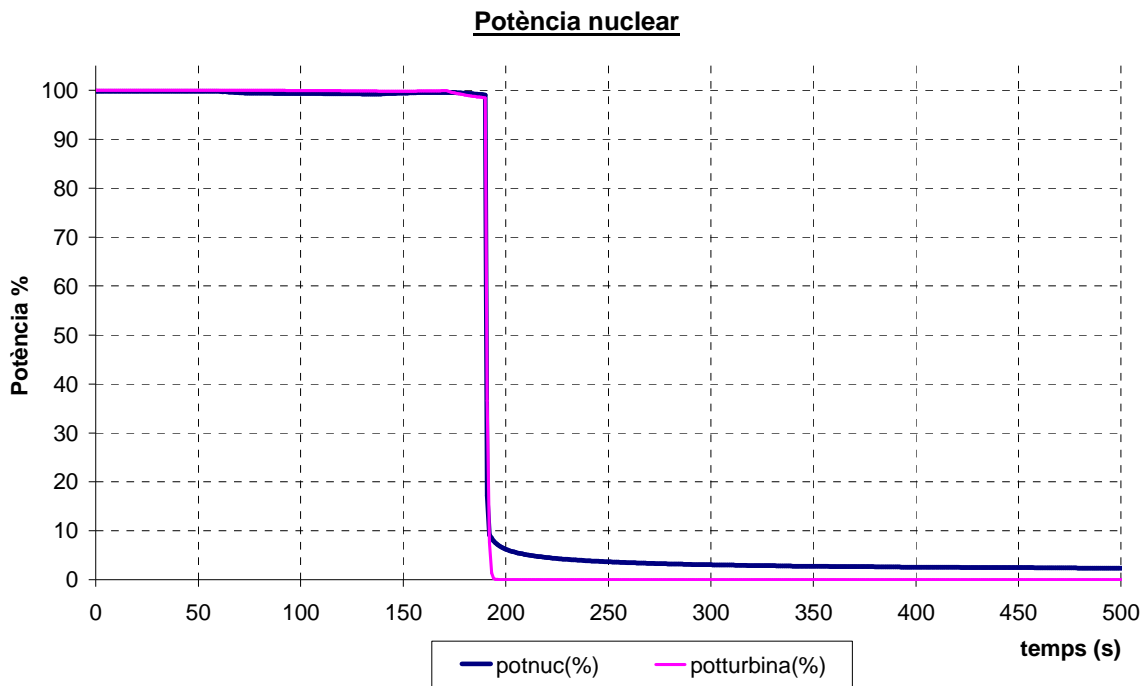


Gràfic 8-4: Cabals primari-secundari zona ruptura

Com podem comprovar, el cabal que ve de la caixa d'aigües és bastant major que el cabal del tub, gairebé el triple. Aquesta diferència és conseqüència directa de la diferència de pressions entre l'extrem del tub i la caixa d'aigües. En el tub hi ha unes pèrdues per fricció que fan que la pressió sigui inferior. Per tant la diferència de pressions entre primari i secundari es inferior en aquest cas, implicant que el cabal també ho sigui.



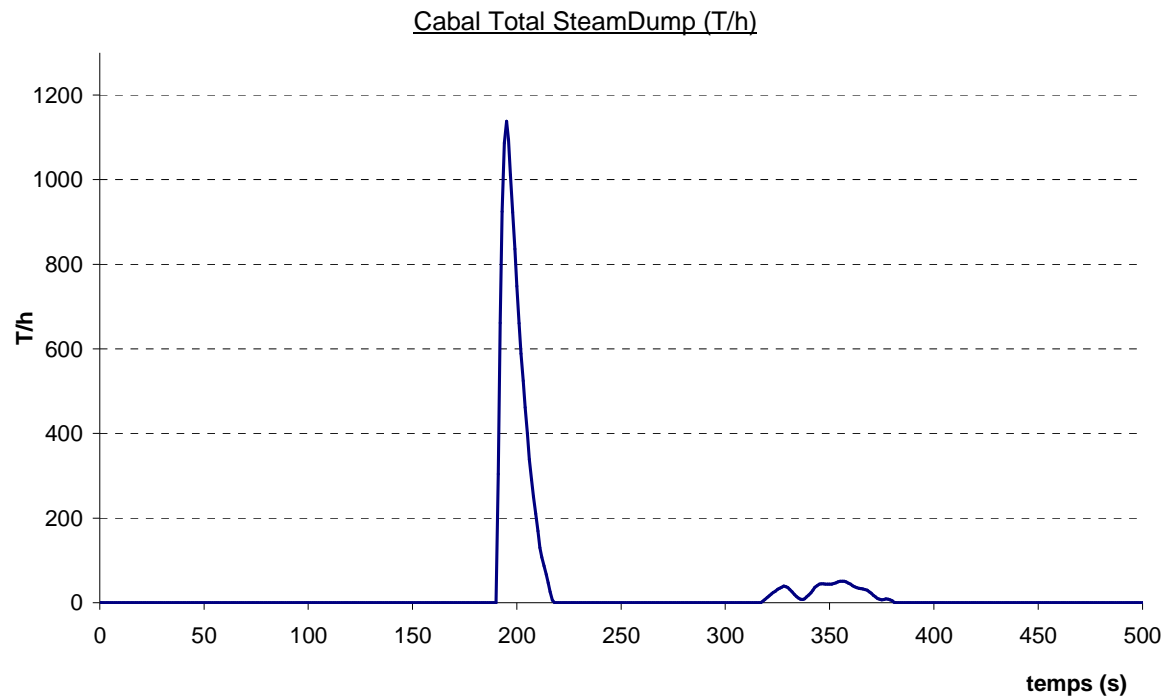
Als 191 segons hi ha una aturada de la potència nuclear causada per una senyal de OTΔT. La potència de la turbina segueix al reactor, arribant a aturar-se completament als 290s. (veure Gràfic 8-5)



Gràfic 8-5: Potència nuclear

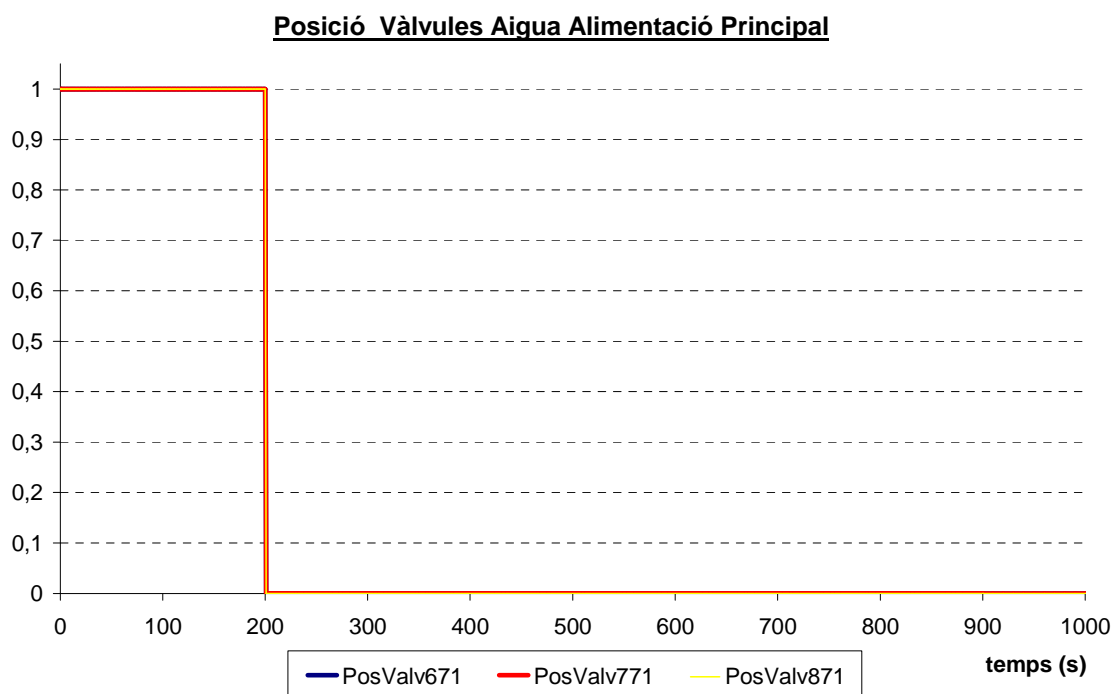
Per tal d'alleujar el cabal de vapor que hi ha, s'activa el Steam Dump bolcant una part d'aquest al condensador entre els 192 i 216s. Després es torna a activar entre els 318 i 380 segons, alliberant menys quantitat. (Gràfic 8-6)





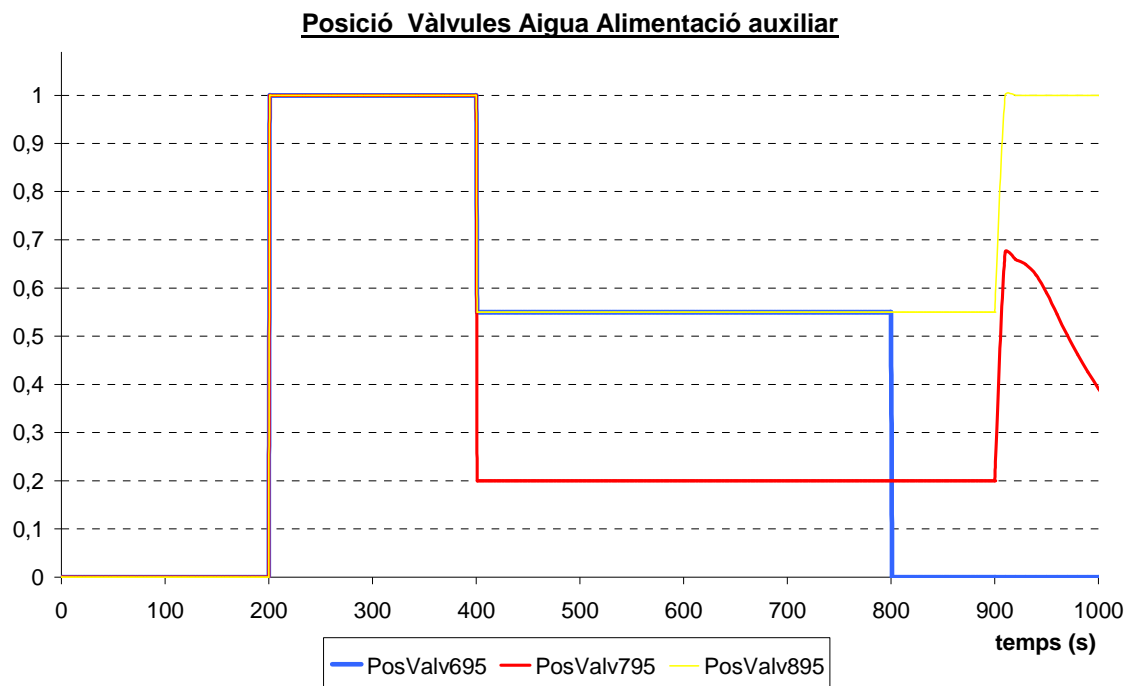
Gràfic 8-6: Cabal SteamDump

Nou segons després de l'aturada del reactor el sistema de control aïlla l'aigua d'alimentació principal i activa simultàniament l'entrada de l'aigua d'alimentació auxiliar.



Gràfic 8-7: Posició vàlvules aigua alimentació principal



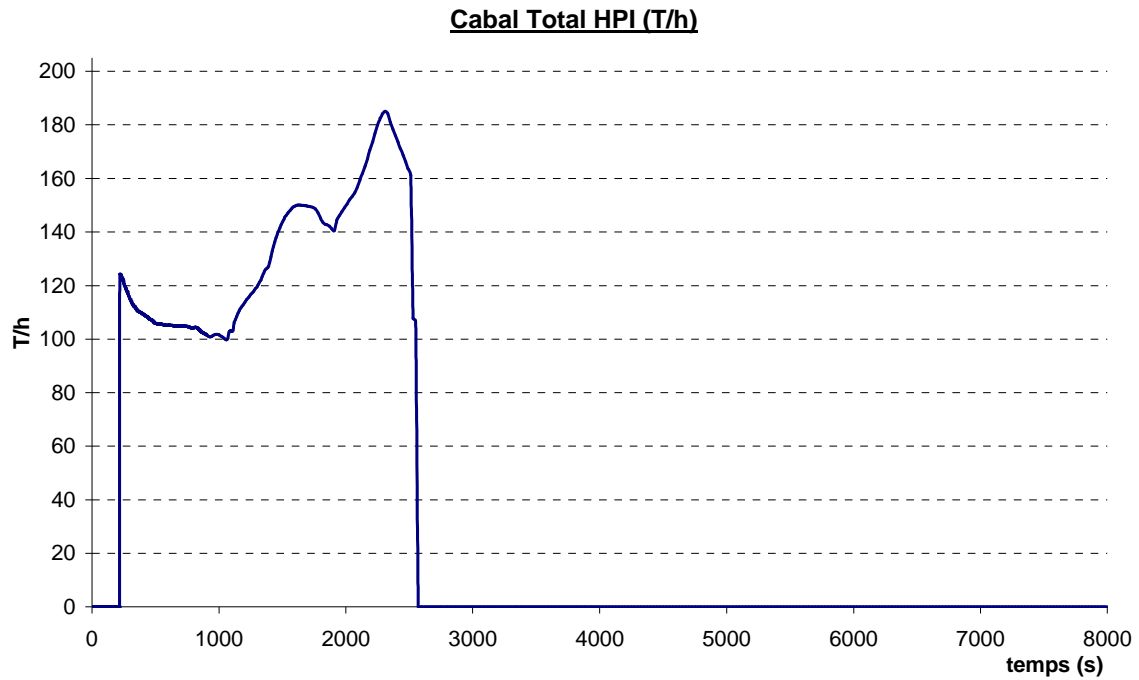


Gràfic 8-8: Posició vàlvules aigua alimentació auxiliar

En el gràfic anterior (Gràfic 8-8) també es pot observar la regulació de cabal efectuada als 400s, per tal de que el tres llaços tinguin el mateix cabal, aproximadament 55 T/h. La raó de que no totes les vàlvules tinguin el mateix grau d'obertura es degut a que no hi ha simetria en les línies d'aportació d'AAA, i que la línia que regula la vàlvula 795 és la que rep major cabal de la turbobomba d'AAA, la qual dona més cabal que les motobombes. Per tant tot hi haver obert les interconnexions de l'AAA, el generador de vapor 2 rebria més fluid si no es realitzés aquesta distinció.

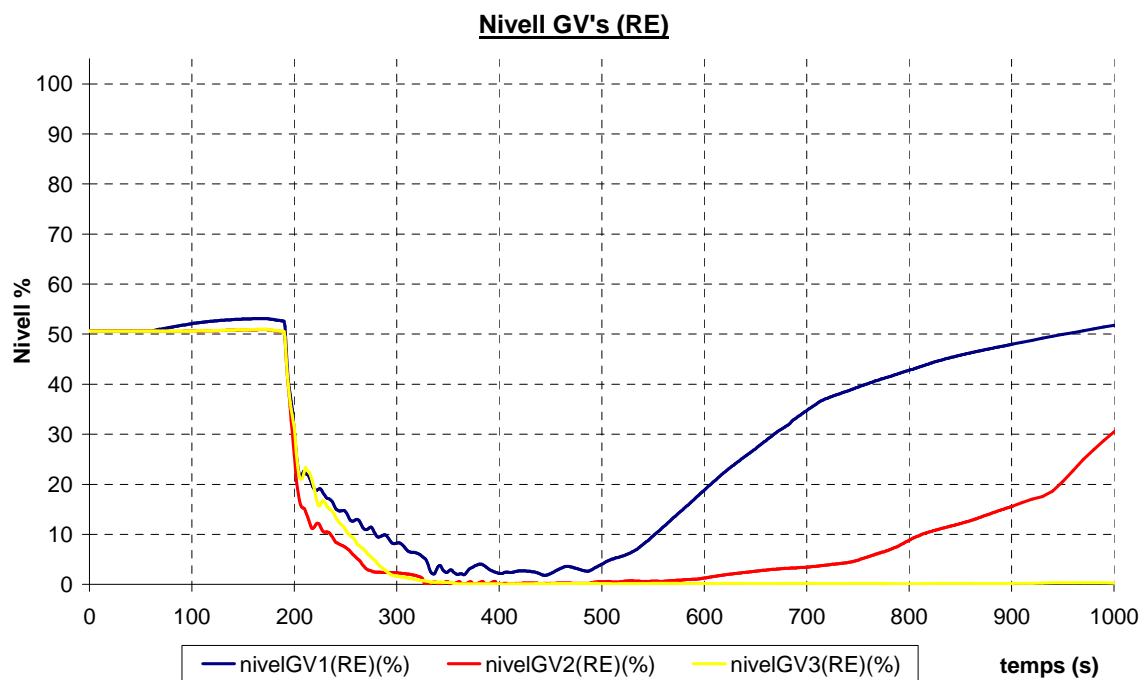
Anteriorment a l'obertura de les interconnexions es produeix l'entrada de la injecció de seguretat d'alta pressió (HPI) per baixa pressió del pressionador (130 kg/cm^2) (veure Gràfic 8-9)





Gràfic 8-9: Cabal injecció de seguretat d'alta pressió

A partir d'aquest moment comencen les accions incloses en la IOE E-3. Primerament identificar el generador de vapor amb la ruptura, el qual podem identificar clarament als 660 segons, moment en el qual té un 30% de nivell, enfront del 3% que té el GV2. (Gràfic 8-10)



Gràfic 8-10: Nivell rang estret dels GV



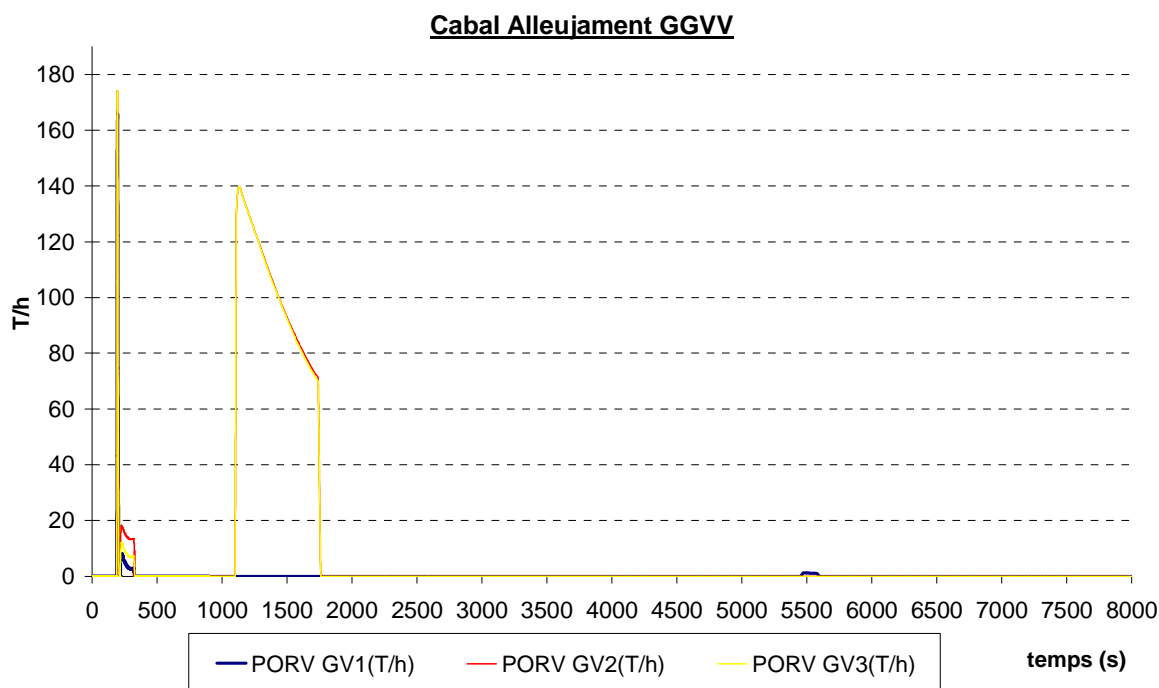
En aquest moment, els operadors de la sala de control saben quin es el GV afectat, i per tant, es procedeix a ajustar el tarat de la vàlvula d'alleujament a 81 kg/cm^2 , aïllar el cabal des d'aquest a la turbobomba, aïllar també la purga, i tancar les vàlvules d'aïllament (MSIV) i el seu by-pass.

En els 800 s. es realitza el pas 4b, tallar l'entrada d'aigua d'alimentació auxiliar al generador de vapor amb el trencament, tal i com es pot comprovar en el Gràfic 8-8, mostrat anteriorment.

Després d'aquests passos tenim el generador de vapor totalment aïllat del secundari, i que només resta en contacte amb el primari pel tub trencat.

La següent acció a realitzar és controlar el cabal d'alimentació als generadors intactes per mantenir el nivell de rang estret entre 29 i 50%, per a la realització d'aquest pas s'usa el control creat que s'ha exposat en l'apartat 8.4.1 *Control del nivell de RE generadors de vapor*, i gràcies a aquest el nivell dels GV augmenta per tal d'aproximar-se al valor tarat.

Tot seguit, als 1100s, es realitza el refredament del sistema mitjançant l'alliberament de vapor a través de les vàlvules d'alleujament dels GV intactes a ritme màxim, fins que el primari assoleixi la temperatura desitjada. Aconseguint a més, una reducció de la pressió dels dos circuits, primari i secundari.

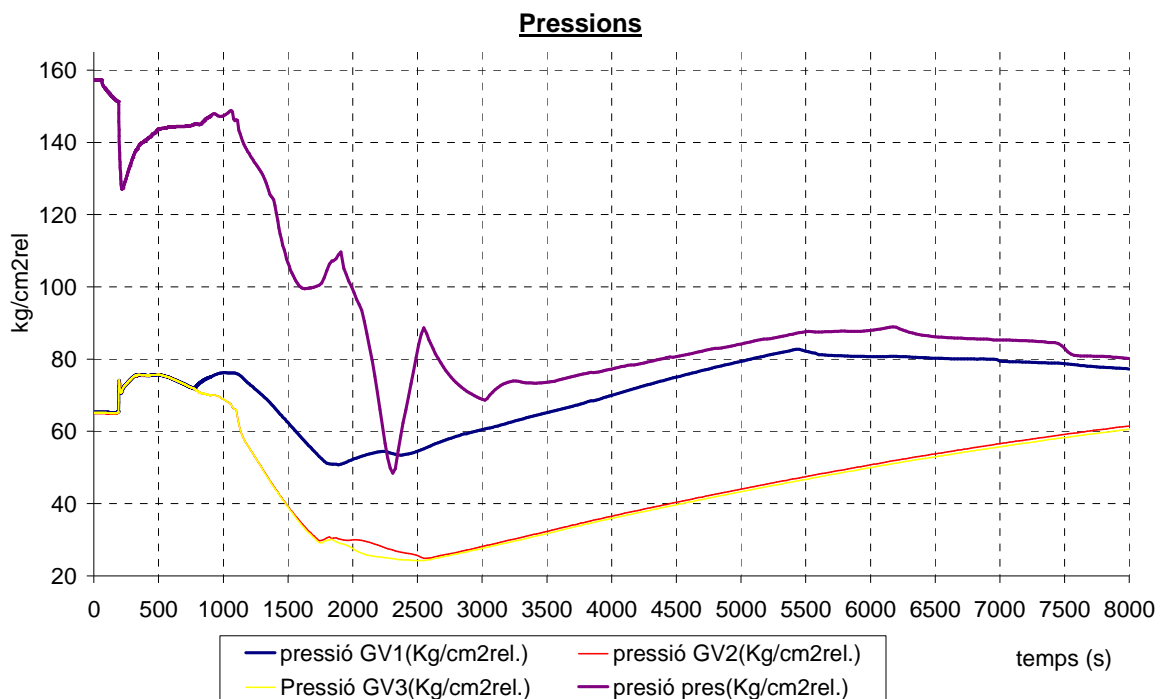


Gràfic 8-11: Cabal vàlvules alleujament dels generadors de vapor



Mirant les temperatures mitjanes de sortida del nucli, veiem que passem des de 281,8 °C als 1100 segons fins a 236,2 °C en el 1750 s, quan aturem l'alleujament de vapor. Per tant s'ha realitzat un refredament de 45,6°C en el primari.

Realitzem el pas 17b als 1700 segons, obrint una dutxa del pressonador al 100%, aconseguint reduir la pressió del primari, i l'augment del nivell del pressonador simultàniament. La dutxa, es tanca automàticament mitjançant el control que s'ha implementat, un cop es compleix la condició de que hi ha una inversió de les pressions primari-secundari als 1900s, com es pot comprovar en el següent gràfic (Gràfic 8-12).



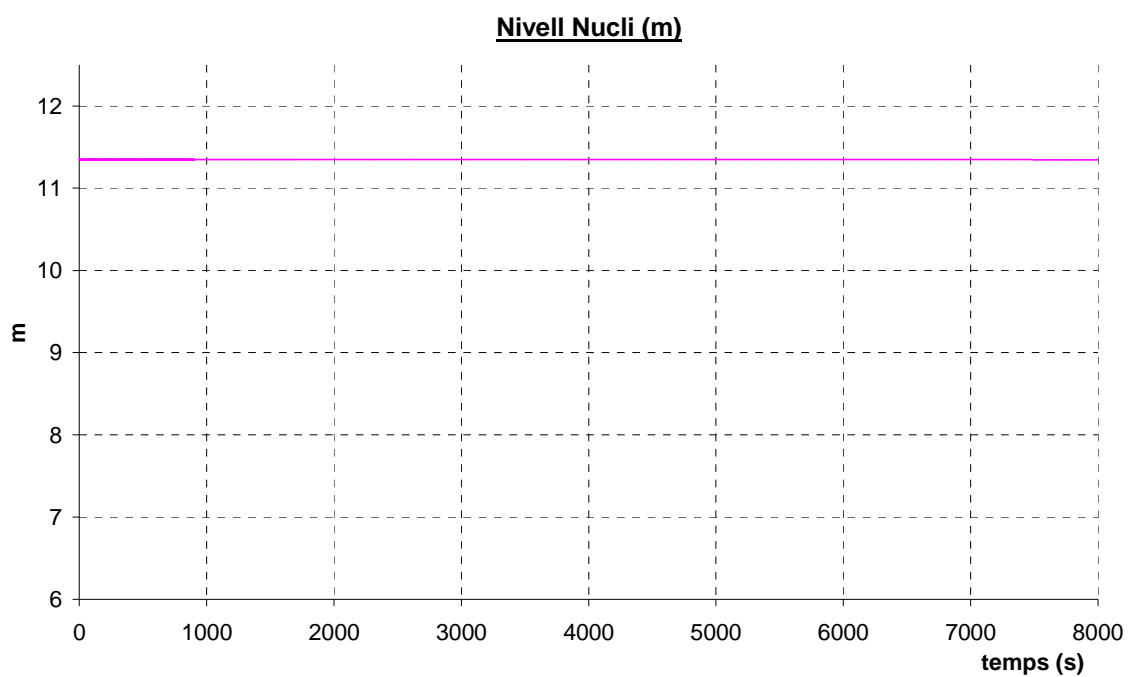
Gràfic 8-12: Pressions primari i GGVV

Les accions que resten a continuació, són la finalització de la injecció de seguretat manualment i la reposició de la senyal de IS a mode automàtic. Per tal de que en cas de necessitat torni a connectar-se, cas que no succeeix en aquest escenari. Aquesta acció es pot observar en el Gràfic 8-9, mostrat anteriorment en la pàgina 49. Altrament també es reactiva el sistema de control químic i de volum (CVCS Chemical and Volume Control System) encarregat del cabal de càrrega entre altres funcions.



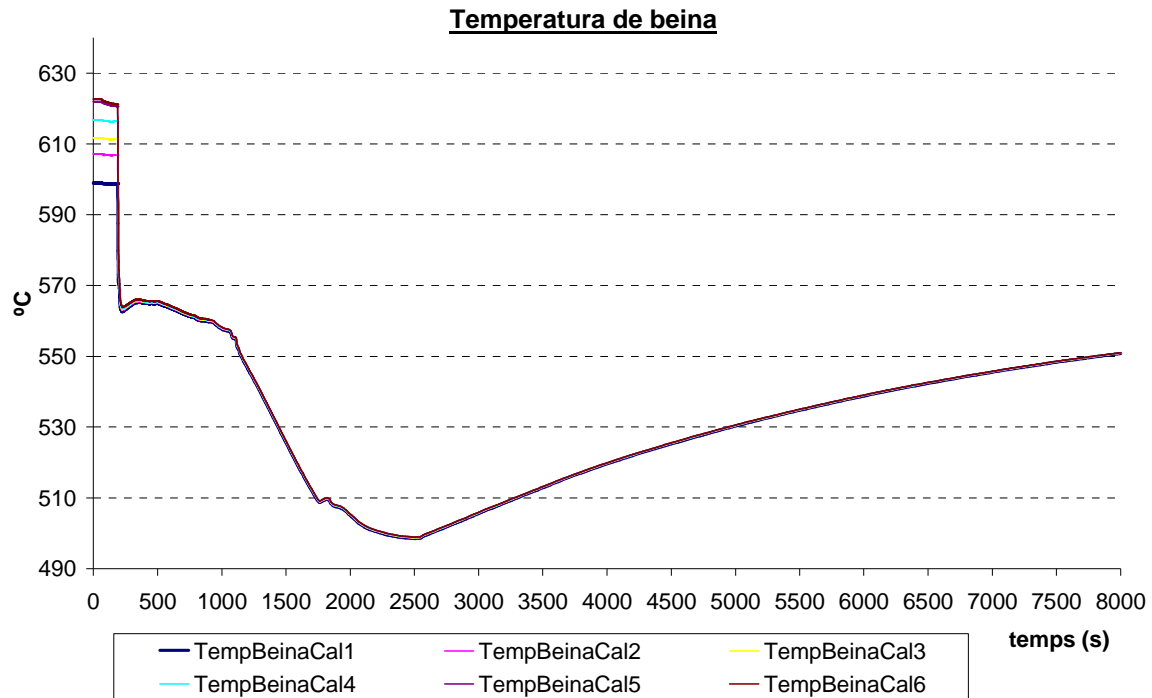
El transitori finalitza als 8000 segons.

També cal destacar que en aquest escenari no hi ha hagut cap vulneració dels paràmetres considerats de seguretat, com per exemple, no hi ha disminució del nivell del nucli (Gràfic 8-13), i la temperatura de beina es sempre inferior al valor que té en estat estacionari (mirar Gràfic 8-14)



Gràfic 8-13: Nivell nucli en metres





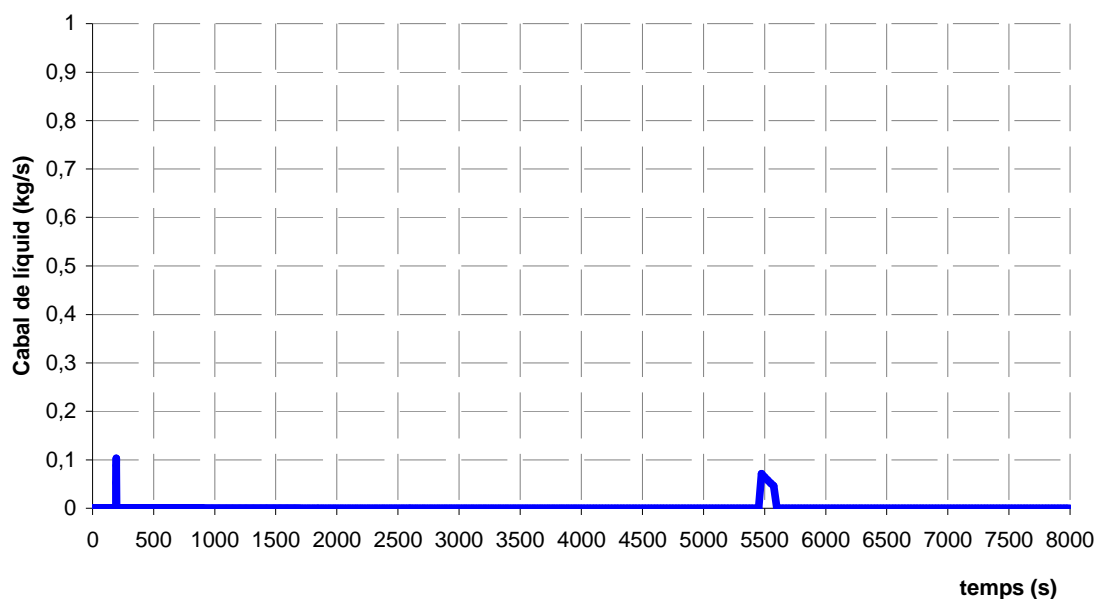
Gràfic 8-14: Temperatura de beina

Cal comentar que la pujada de la temperatura de beina a partir dels 2600 segons no és una acció inesperada, sinó que és una reacció normal degut a que a partir dels 2580 segons no es realitza cap tipus de refrigeració. Sinó que deixem la planta que actuï per si sola per tal de demostrar que un cop realitzades les accions esmentades anteriorment, la planta ja està en una situació estable, i pot estar molt temps sense necessitat de cap acció humana.

Aquesta procediment de no realitzar cap més actuació, després de l'aturada de la injecció de seguretat i reposició del cabal de càrrega a mode automàtic, s'ha realitzat en tots els escenaris realitzats. L'objectiu, és estudiar el comportament de la planta únicament amb les accions descrites.

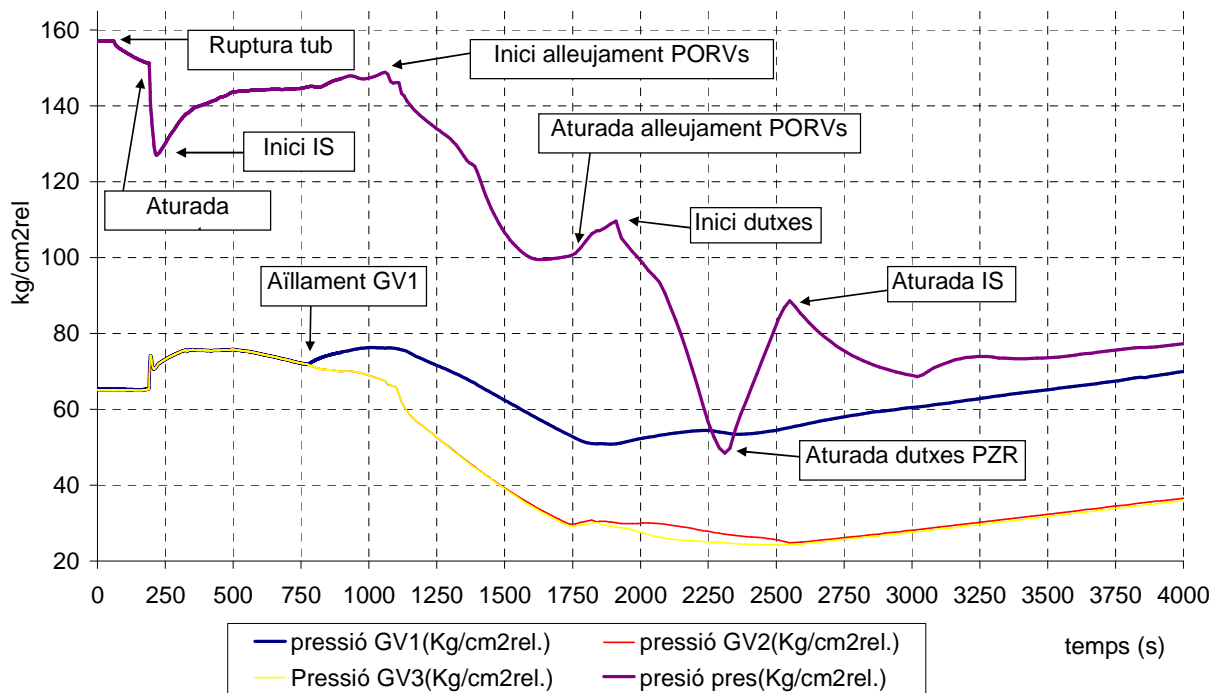
Una conseqüència de la fuga de fluid del primari al generador de vapor amb ruptura, és que el secundari del generador de vapor, al estar aïllat, es va omplint. Pot arribar el cas en que s'ompli totalment, i sobreixi líquid per la vàlvula d'alleujament. Aquest és un paràmetre molt important, ja que el líquid que surt no és únicament l'aigua del secundari, sinó que hi ha líquid que ha estat en contacte amb el nucli, i pot tenir rastres de radiació. Com es pot observar en la següent gràfica (Gràfic 8-15), no es el cas d'aquest escenari. Però com veurem més endavant, serà el paràmetre limitant per discriminar les accions que duen a condicions d'estabilitat.



Cabal de líquid vàlv. Alleujament GV1

Gràfic 8-15: Cabal líquid alleujament GV1

A mode de resum, es mostra el gràfic de les pressions del pressionador i els generadors de vapor amb les accions més importants senyalades en l'instant de temps concret que succeeixen (Gràfic 8-16) i la taula-resum de les accions (Taula 8-3).

Pressions

Gràfic 8-16: Pressions primari i secundari (detall)



CAS BASE

Temps

Accions realitzades / Accions importants automàtiques

Instruccions Operació d'Emergència: IOE-E-3 Ruptura de tubs en un generador de vapor	Acció provocada	60	Ruptura un tub GV1
	Accions de protecció automàtiques	191	Aturada del reactor per OTDT
		192-216	Steam-Dump
		200	Aïllament AAP; inici entrada AAA
		216	Entrada HPI per baixa pressió PZR
	Pas previ	400	Obrim interconnexions AAA
		400	Regulem cabal AAA: 1-->55%; 2-->20%; 3-->55%
	Pas 2	660	Identifiquem GV amb ruptura per augment inesperat del RE-->GV1
	Pas 3a	690	Ajustem punt tarat valv. Allujament (PORV) GV1 a 81 kg/cm2
	Pas 3c	710	Aïllar cabal vapor desde GV1 a TBAAA
	Pas 3d	740	Aïllar cabal de purga
	Pas 3e	770	Tancament valvules aïllament (MSIV) GV1 i baipas
	Pas 4b	800	Interrumpir cabal alimentació GV1
	Pas 7b	900-endavant	mantenir RE entre 29%-50%[43%-50%]; programat al 50% automaticament
	Pas 14	1100	Inici refredament mitjançant PORVs GV2 i GV3
		1750	Aturar refredament amb PORVs
	Pas 17b	1900	Obertura dutxes
	Pas 17c	2320	Finalització obertura dutxes (acció automàtica programada)
	Pas 21c	2520	Aturada 1º motor HPI
	Pas 21c	2550	Aturada 2º motor HPI
	Pas 23	2580	Reposició Cabal de carga automàtica <--> reposició IS a senyal automàtic

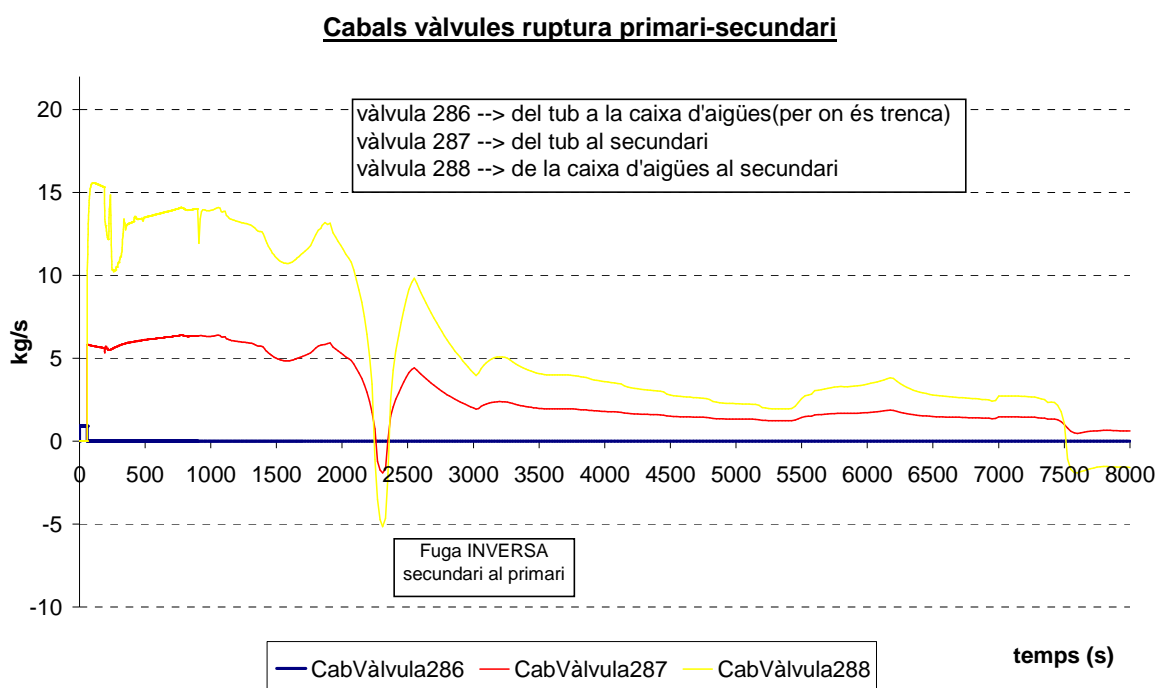
Taula 8-3: Cronologia accions cas base



8.6. Conclusions de l'anàlisi del ruptura d'un tub

L'anàlisi del cas base de ruptura d'un tub d'un generador de vapor, ens demostra que és possible arribar a condicions d'estabilitat i poder procedir a una parada ordenada, si es segueixen correctament les accions indicades en les Instruccions d'operació d'emergència.

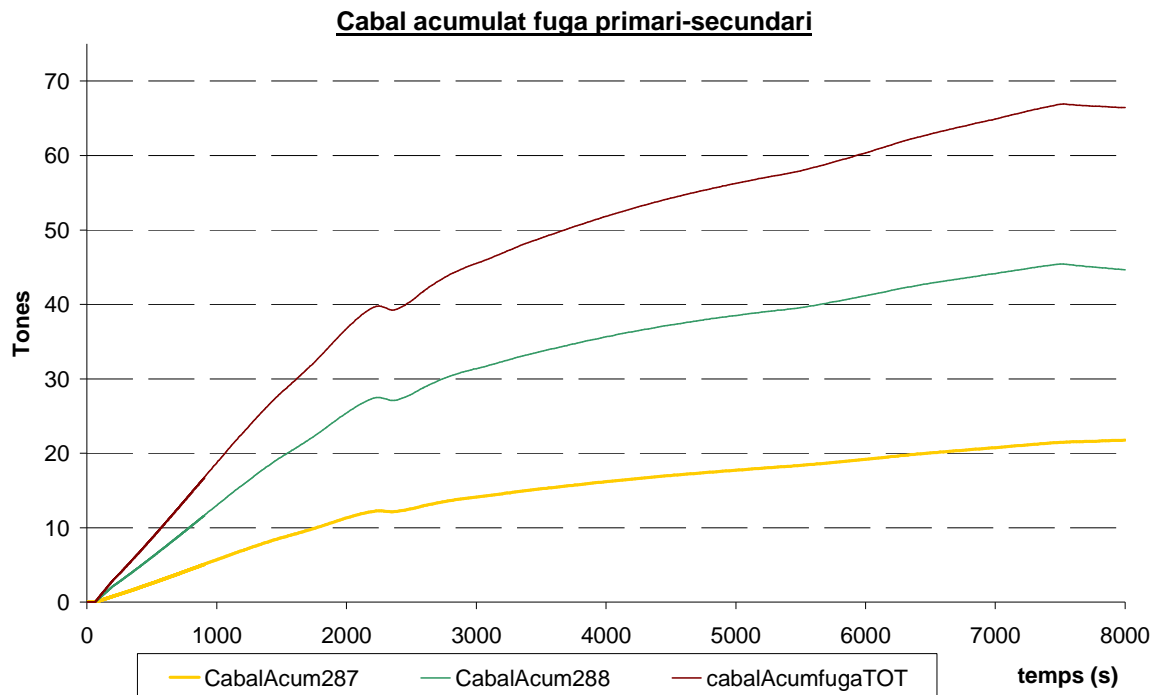
Per arribar a senyalar que aquest es un cas base i òptim s'han realitzat moltes simulacions canviant accions i temps d'elles. S'ha tingut en compte alguns paràmetres que considerats clau, un d'ells és aconseguir la reducció de cabal que fuga per la ruptura al primari. Per tal de quantificar aquesta disminució s'ha seguit durant tot el transitori el cabal que fugava (Gràfic 8-17).



Gràfic 8-17: Cabals intercanvi primari-secundari

A més a més, i amb l'objectiu de comparar la quantitat amb d'altres escenaris s'ha realitzat un seguiment del cabal acumulat en l'intercanvi primari-secundari (Gràfic 8-18)





Gràfic 8-18: Cabal acumulat intercanvi primari-secundari

El paràmetre de reducció del cabal fugat s'ha considerat clau, ja que és un dels objectius de la IOE-E-3, el qual va lligat amb la igualació de pressions entre primari i secundari. Analitzant les accions que més influeixen en aquest dos paràmetres veiem que les més importants són per una banda l'obertura de la dutxa normal del pressionador, que en aquest escenari arriba fins hi tot a invertir les pressions. Per tant fer que el cabal sigui del primari al secundari. Per l'altra banda, la finalització de la injecció de seguretat també ens du a la reducció de cabal entre els dos circuits. S'ha decidit analitzar en profunditat la influència d'aquestes dues accions en el transitori de ruptura de tubs en apartats posteriors.

També és important, el pas 14, refredament mitjançant les vàlvules d'alleujament dels GV intactes. Però s'ha comprovat mitjançant simulacions que aquest pas és menys influent, ja que per exemple un avanç en el temps de tancament de les vàlvules, que implica una reducció més petita de la temperatura i menor disminució de les pressions, es veu compensat en el pas 17, obertura de les dutxes. Aquest fet es explica perquè les dutxes s'han d'aturar quan es compleixen les condicions establertes en la IOE, i les pressions no experimenten una disminució major, llavors, no hi ha una gran diferència entre el cabal de fuga intercanviat, almenys en el casos similars al cas base. Aquests càlculs es poden trobar en el annex.



8.7. Arxius

Nom de l'arxiu	Contingut
ANA0404Ma.inp	Model de la planta Ascó (estacionari)
estANA0404Ma.rst	Fitxer de resultats de l'estacionari
IOE_7.inp	Fitxers d'entrada (input)
IS_2520.inp	
IOE_7.out	Fitxers de sortida (output)
IS_2520.out	
IOE_7.rst	Fitxers de resultats
IS_2520.rst	
CasBase.xls	Fitxer de gràfiques

Taula 8-4: Taula arxius cas base



9. Transitori de ruptura de 10 tubs en un GV

9.1. Descripció del transitori de 10 tubs

S'ha realitzat un estudi per comparar les diferències entre la ruptura d'un sol tub, amb la ruptura múltiple, concretament s'ha realitzat el trencament de 10 tubs.

La nodalització realitzada és la mateixa exposada pel trencament d'un tub, però en aquest cas el diàmetre del tub i les vàlvules s'ha definit com 10 vegades la d'un tub, redefinint els corresponents subvolums i estructures de calor associades.

També s'han usat els mateixos controls automatitzats descrits en l'apartat de ruptura d'un tub, encara que el d'obertura i finalització de les dutxes s'ha hagut d'adaptar a l'obertura i tancament de les vàlvules d'alleujament del pressionador, però en essència és el mateix.

Aquest escenari, segons l'ANAV [7], té menys interès des del punt de vista d'operació de les centrals nuclears, degut a dues raons, la primera és que és molt menys probable la ruptura de 10 tubs simultàniament que la ruptura d'un sol tub. Per l'altra banda, el fet del trencament de 10 tubs, provoca que la fuga inicial sigui més gran, la qual cosa facilita el diagnòstic per als operadors de la sala de control, alhora que, també provoca una despressurització molt més gran del primari provocant una més ràpida igualació de pressions.

Tot i això l'objectiu d'aquest estudi és analitzar la diferència entre la ruptura d'un tub i la ruptura múltiple de tubs. També es pretén observar si hi ha canvis en el seguiment de les instruccions d'operació d'emergència, i la magnitud d'aquests. No es tornarà a referir a totes les operacions que s'han realitzat com en el cas de ruptura d'un sol tub, ja que bàsicament són les mateixes, i es poden trobar en l'apartat 8.2, sinó que s'intentarà centrar en les diferències entre elles.

Les gràfiques semblants al cas de ruptura d'un tub, s'ha preferit obviar-les per raó d'espai, però es troben en l'annex.

A més, també s'ha realitzat un escenari d'error en el seguiment de les IOE. Postulant que s'han realitzat les mateixes accions que en l'escenari de ruptura d'un tub, per tal d'observar si igualment es podria arribar a condicions d'estabilitat.



9.2. Condicions inicials

Les simulacions comencen després d'un transitori nul de 12.000 segons, i les condicions inicials són les que es mostren en la següent taula (Taula 9-1):

Condicions inicials	
Potència	99,81%
Pressió primari	157,2 kg/cm ² rel
Posició barres de control	Òptima
Sistemes	En operació normal per al nivell de càrrega de plena potència

Taula 9-1: Condicions inicials simulacions

▪ ESDEVENIMENT INICIADOR

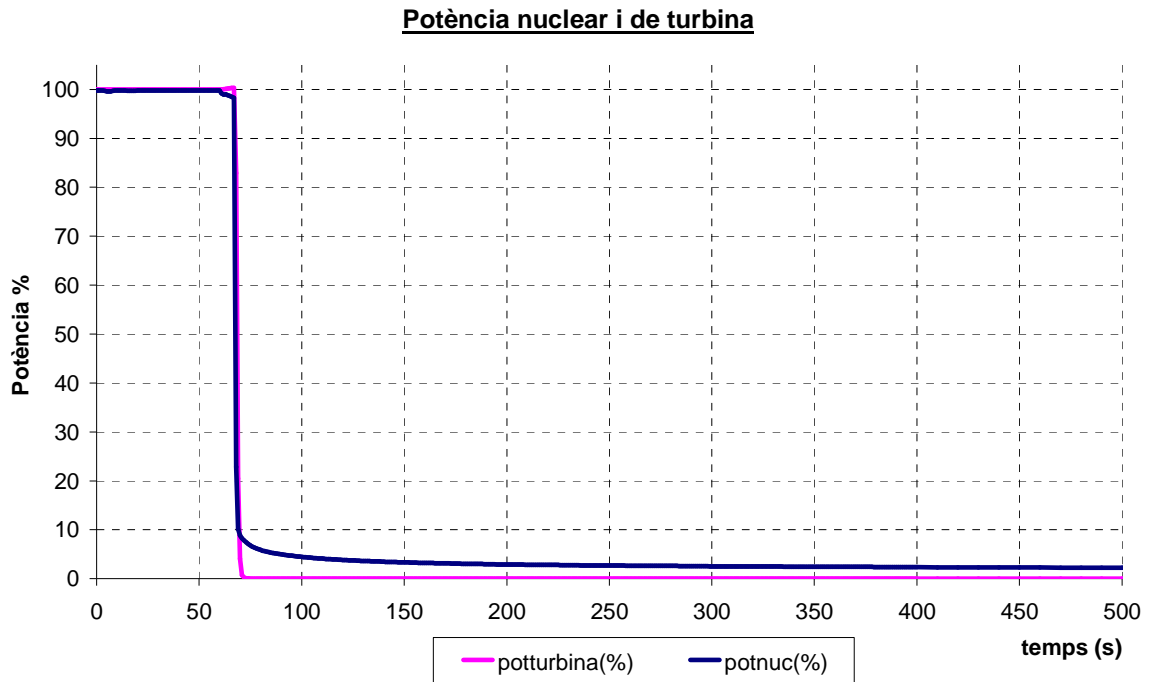
t=60s Ruptura de 10 tubs del generador de vapor 1 entre la sortida del tub i l'entrada de la caixa d'aigües.

S'ha usat el mateix model de planta que en el cas de ruptura d'un tub per evitar paràmetres aliens.

9.3. Anàlisi del cas base de ruptura múltiple de tubs

Realitzant la ruptura al mateix temps que en el cas de ruptura simple, la primera diferència és que el reactor s'atura als 68 segons, just 8 segons després de la ruptura, mentre que en el cas d'un tub tarda 131 segons. Aquest ja es un factor que fa que en el cas múltiple, com s'anirà comprovant, totes les accions siguin molt més avançades en el temps.





Gràfic 9-1: Potència nuclear i de turbina

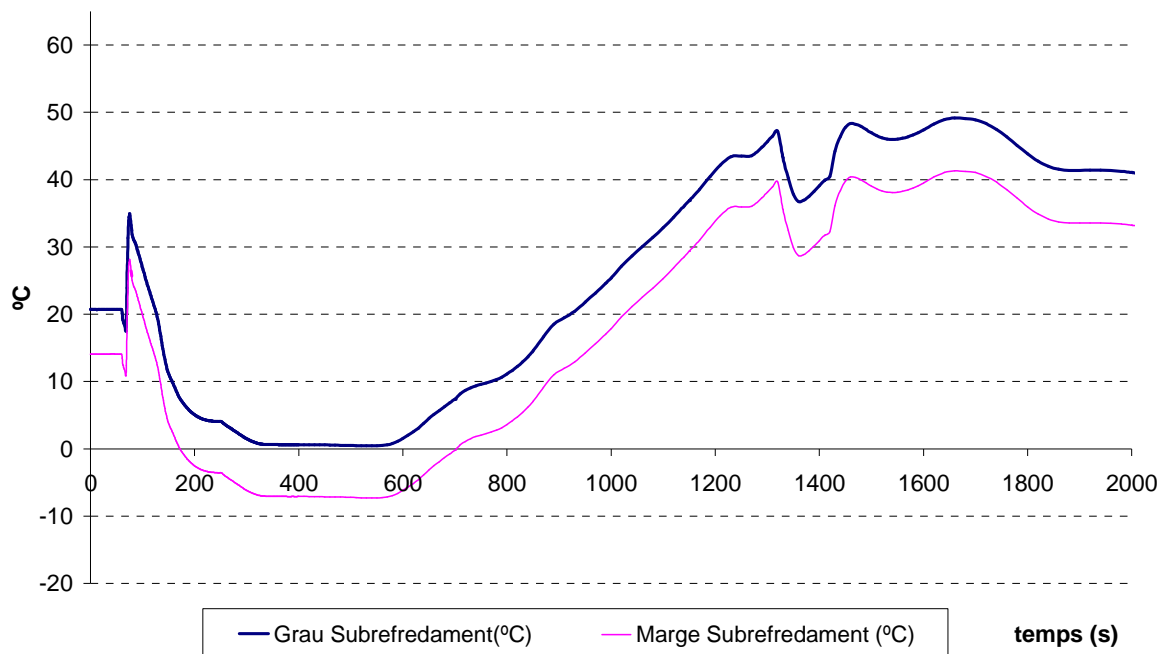
La turbina segueix al reactor i també s'atura, igual que en el cas de ruptura simple hi ha l'entrada del Steam dump alliberant vapor al condensador. S'aïlla l'entrada d'aigua alimentació principal i entra l'alimentació auxiliar. Als 86 segons entra la injecció d'alta pressió. Les gràfiques representatives d'aquestes accions es troben en l'annex.

Als 200 segons regulem el cabal per tenir una aportació de 55 T/h i obrim les interconnexions.

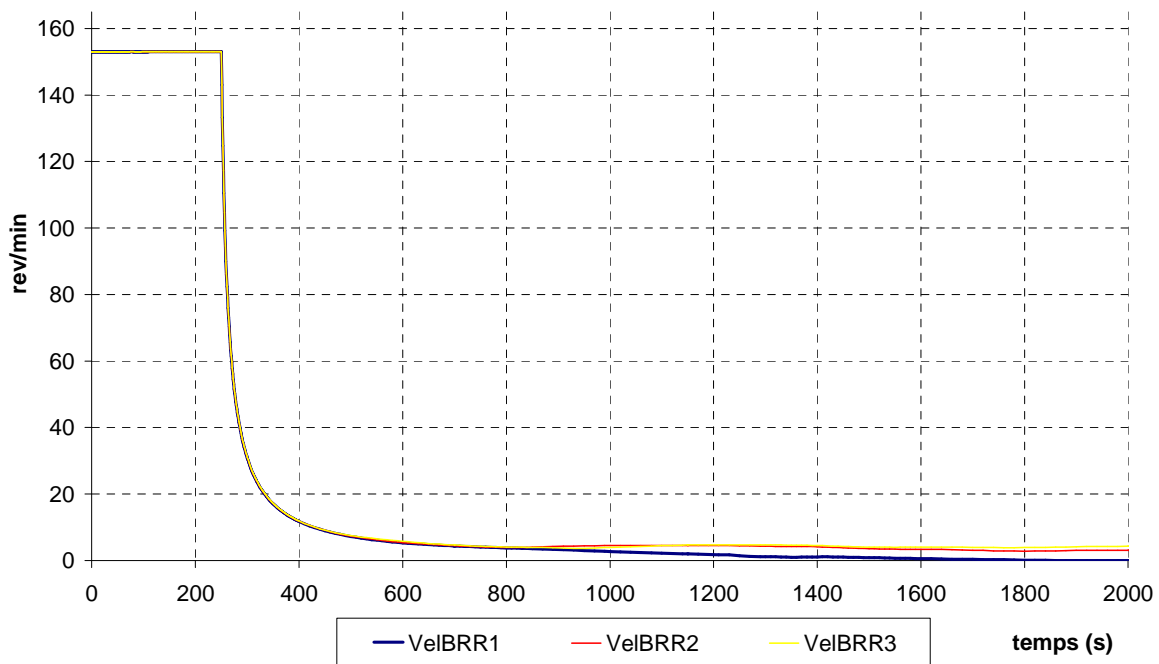
S'entra en la IOE-E-0, i es realitzen les comprovacions necessàries sense cap acció manual fins al pas 21, el qual indica que si el marge de subrefredament del sistema de refrigerant del reactor basat en termoparells de sortida del nucli es inferior a 0 °C, s'han d'aturar les bombes del refrigerant del reactor.

En aquest cas es compleix (Gràfic 9-2), per tant hem d'aturar les bombes (Gràfic 9-3), i deixar el primari en mode de circulació natural.



Subrefredament

Gràfic 9-2: Grau i marge de subrefredament del RCS

Velocitat Bombes Refrigerant del Reactor

Gràfic 9-3: Velocitat bombes del RCS

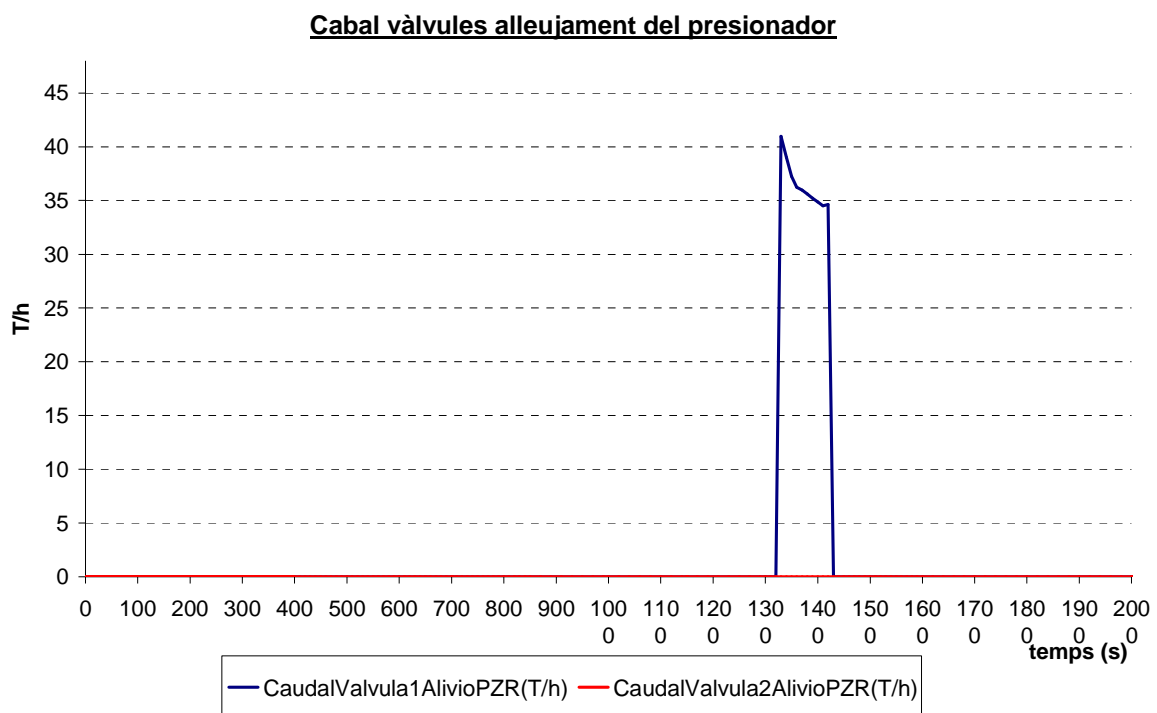


Continuant amb la IOE-E-0 s'arriba a la instrucció número 23, que porta a la IOE-E-3 *Ruptura de tubs en un generador de vapor*. Realitzem els passos igual que en el cas base d'un tub, seguint les indicacions de pas de temps de la Taula 8-1, fins a arribar al pas 17.

Al haver tancat les bombes de refrigerant del reactor, les dutxes han quedat inutilitzades degut a què s'alimenten de la impulsió de les bombes. Però la instrucció ja preveu aquest possible estat, i fa passar al pas 18, pas que no es realitza en el cas de ruptura d'un sol tub.

El pas 18 de la IOE E-3, té la mateixa funció del pas 17, però mitjançant l'obertura d'una vàlvula d'alleujament del pressionador (Gràfic 9-4). Aquesta és una operació més delicada ja que pot dur a condicions anormals del recinte de contenció, o la formació de vapor en la regió superior del nucli, per tant són paràmetres que s'han de controlar.

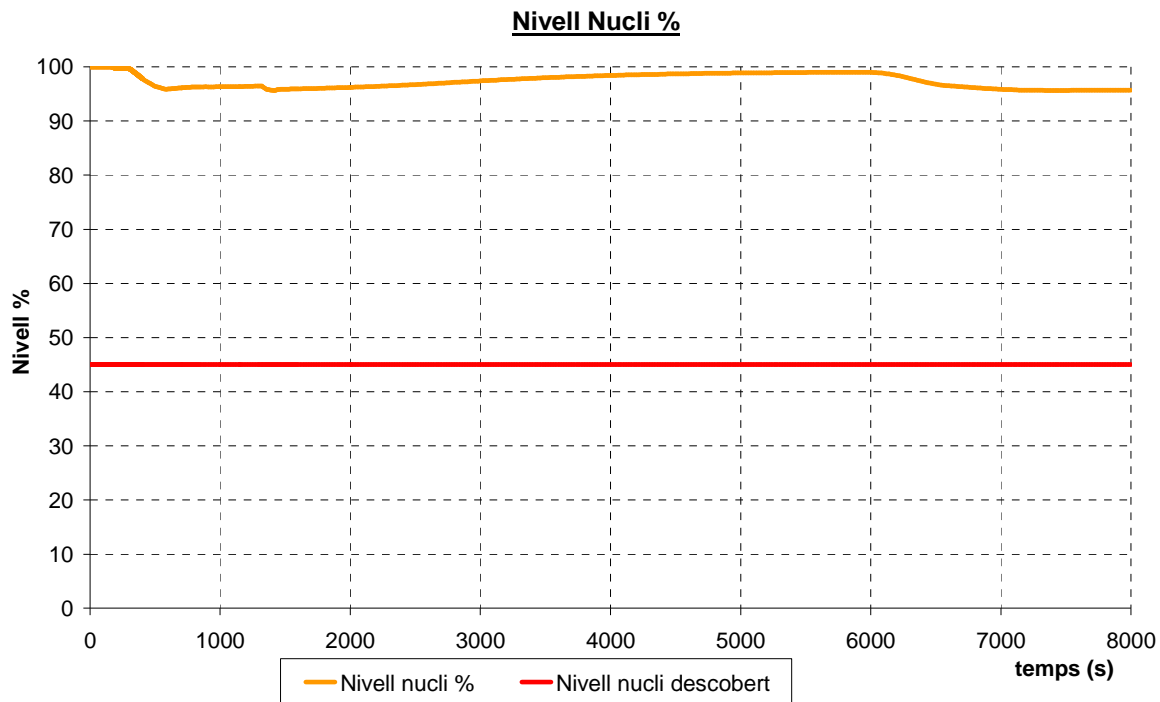
Les condicions de tancament de les vàlvules d'alleujament del pressionador son les mateixes que en el cas de ruptura simple, i s'usa el controlador automàtic de les dutxes del pressionador, modificat per a complir aquesta funció.



Gràfic 9-4: Cabal vàlvules alleujament del pressionador

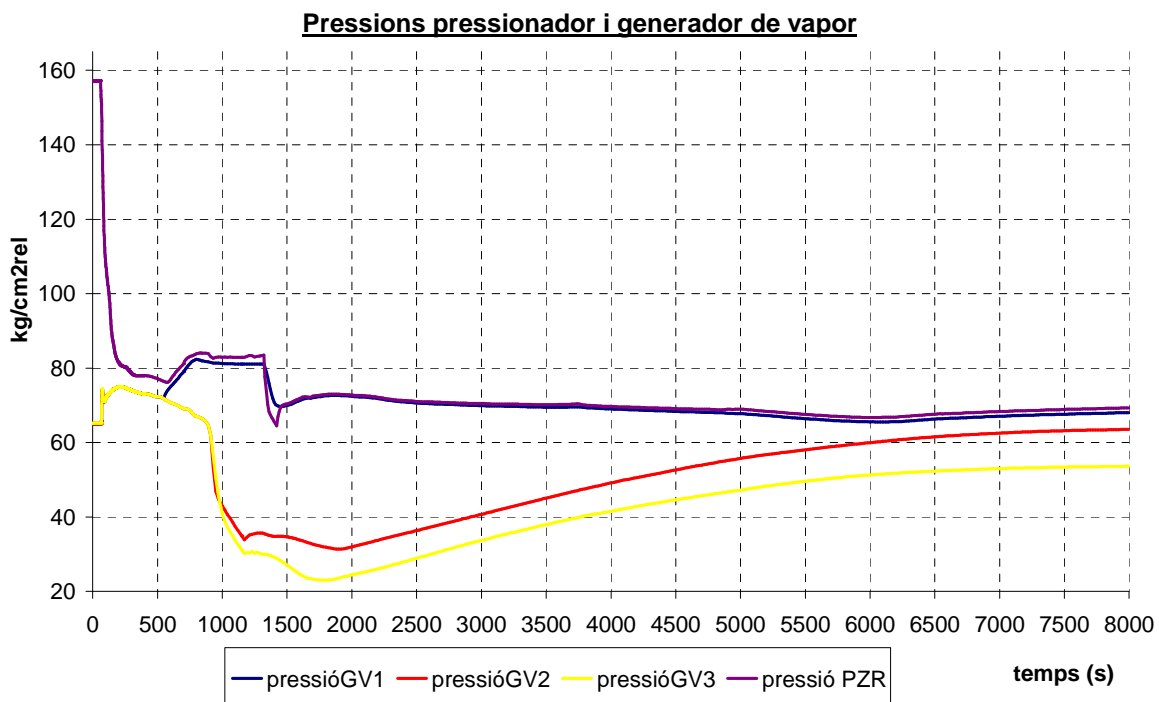
Observant el nivell del nucli (Gràfic 9-5) es veu que sí que hi ha hagut una petita baixada del nivell d'aquest, però no és cap baixada anormal, i no s'acosta gens al nivell del 45% de descoberta de nucli, per tant no és una acció que dugui associada cap perill en aquest transitori.





Gràfic 9-5: Nivell del nucli

Les accions posteriors, són les mateixes que en el cas de ruptura de tubs. A continuació podem observar mitjançant les inflexions del gràfic de pressions i la taula-resum del temps, com evoluciona el sistema.



Gràfic 9-6: Pressió del pressionador i dels tres GV

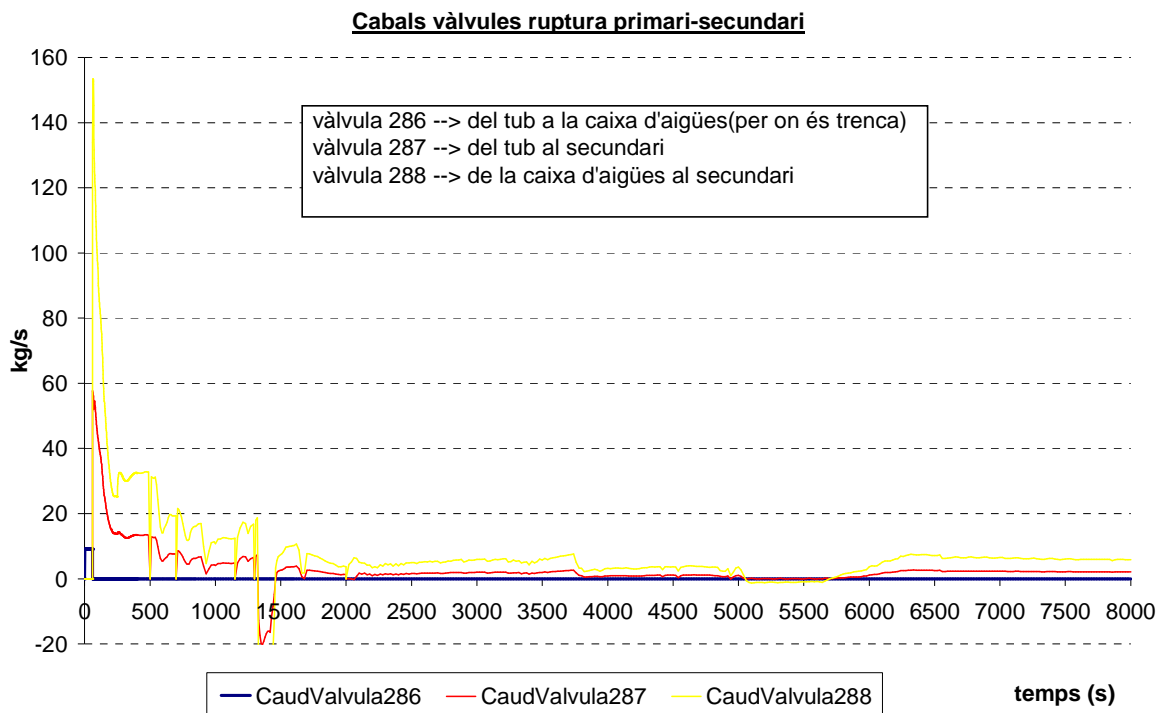


Taula 9-2: Cronologia accions cas ruptura 10 tubs seguint IOE

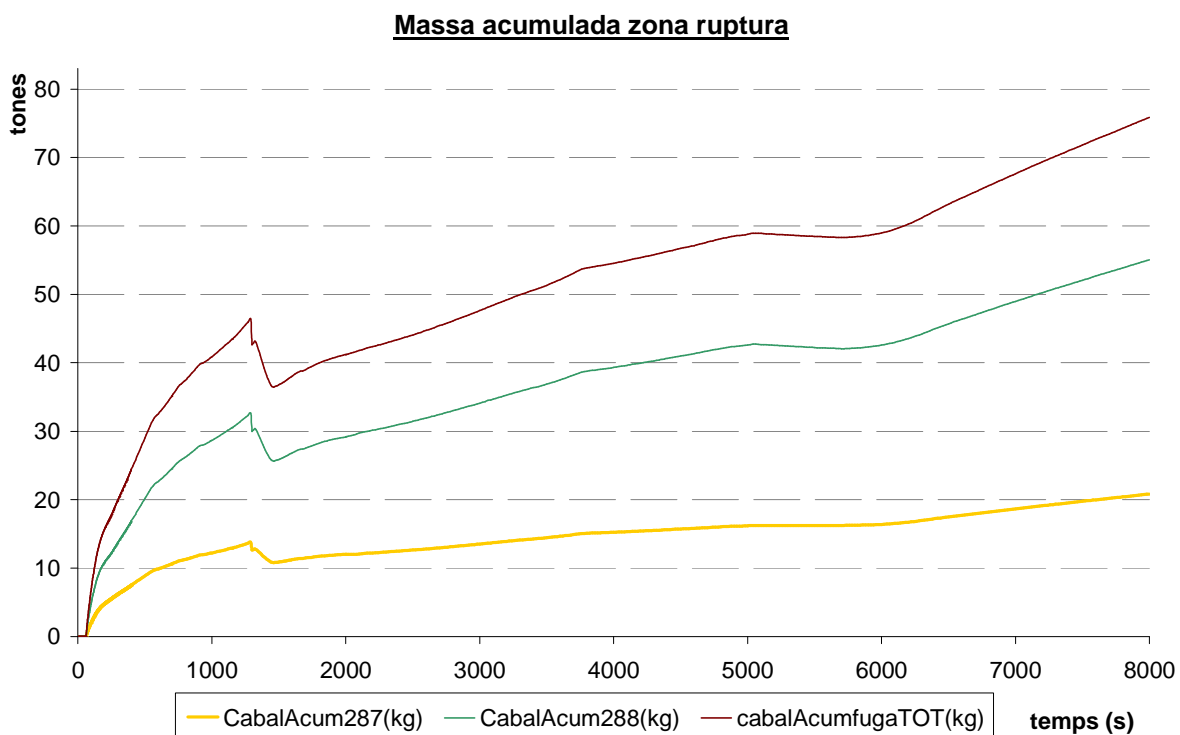
		Temps	Accions realitzades / Accions importants automàtiques
Instruccions Operació d'Emergència: IOE-E-3 Ruptura de tubs en un generador de vapor	Acció provocada	60	Ruptura un tub GV1
		68	Dispar del reactor per OTDT
		68-97	Steam-Dump
		78	Aïllament AAP; inici entrada AAA (per baixa T ^a mitja)
		86	Entrada HPI per baixa pressió PZR (<130 Kg/cm2)
	Pas previ	200	Obrim interconnexions AAA
		200	Regulem cabal AAA: 1-->55%; 2-->20%; 3-->55%
	IOE-E-0 pas 21	250	Aturar Bombes del Refrigerant del reactor
	Pas 2	460	Identifiquem GV amb ruptura per augment inesperat del RE-->GV1
	Pas 3a	490	Ajustem punt tarat valv. Allujament (PORV) GV1 a 81 kg/cm2
	Pas 3c	510	Aïllar cabal vapor desde GV1 a TBAAA
	Pas 3d	540	Aïllar cabal de purga
	Pas 3e	570	Tancament valvules aïllament (MSIV) GV1 i baipas
	Pas 4b	600	Interrumpir cabal alimentació GV1
	Pas 7b	700	mantenir RE entre 29%-50%[43%-50%]; al 50% automaticament
	Pas 14	900	Inici refredament mitjançant PORVs GV2 i GV3
		1170	Aturar refredament amb PORVs
	Pas 17b		Dutxa no disponible
	Pas 18b	1320	Obertura PORV del PZR
	Pas 17c	1420	Finalització obertura PORV (acció controlada automàticament)
	Pas 21b	1620	Aturada 1º motor HPI
	Pas 22	1650	Aturada 2º motor HPI
	Pas 23	1680	Reposició Cabal de carga autòmatica <--> reposició IS a senyal automàtic
	Pas 24	-----	Augmentar Cabal de Carga (c-2490)



A continuació es presenta el cabal transferit al generador de vapor trencat a través de la ruptura. Es pot comprovar que inicialment hi ha un cabal molt gran, però als 1300 segons experimenta una inversió de cabal, i després s'estabilitza.



Gràfic 9-7: Cabal zona ruptura



Gràfic 9-8: Massa acumulada transferida primari - GV afectat



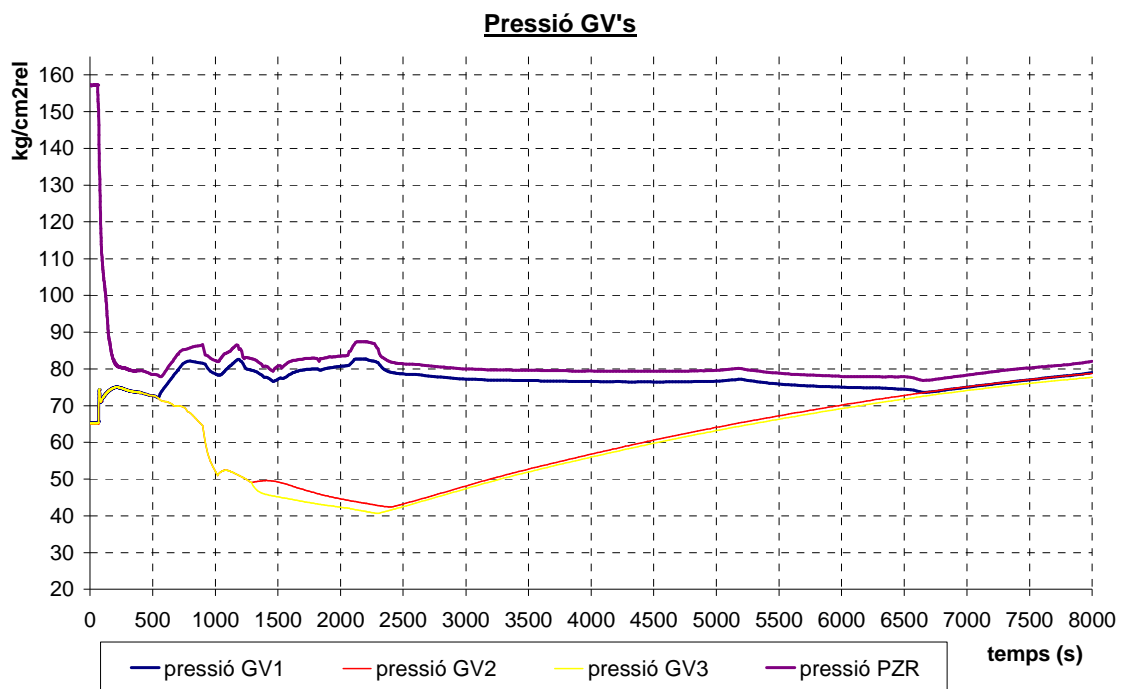
9.4. Anàlisi d'un error en el seguiment de les IOE en una ruptura múltiple

S'ha realitzat un escenari de ruptura de 10 tubs fent la hipòtesis que hi ha un error, i no es tanquen les bombes de refrigerant del reactor (BRR), ja sigui per averia o bé per error dels operadors de la sala de control.

Aquest estudi es interessant, ja que postulant aquesta hipòtesi, es tracta el tractament de 10 tubs seguint les mateixes accions que en el cas base de trencament d'un sol tub, i com a conseqüència, veure si un error en aquest pas ens duu igualment a condicions segures.

En aquest escenari no es realitza el pas 21 de la IOE-E-0, l'aturada de les BRR, per tant, ara si que disposarem de les dutxes del pressionador i es realitza la disminució de pressió del primari mitjançant l'obertura de les dutxes enlloc de amb les vàlvules d'alleujament del pressionador.

Presentant la gràfica de les pressions del primari i els tres generadors de vapor (Gràfic 9-9), es pot observar la despressurització accelerada que provoca la ruptura de 10 tubs del generador de vapor, i que ràpidament les pressions de PZR i GV afectat s'aproximen, reduint així el cabal de la ruptura.

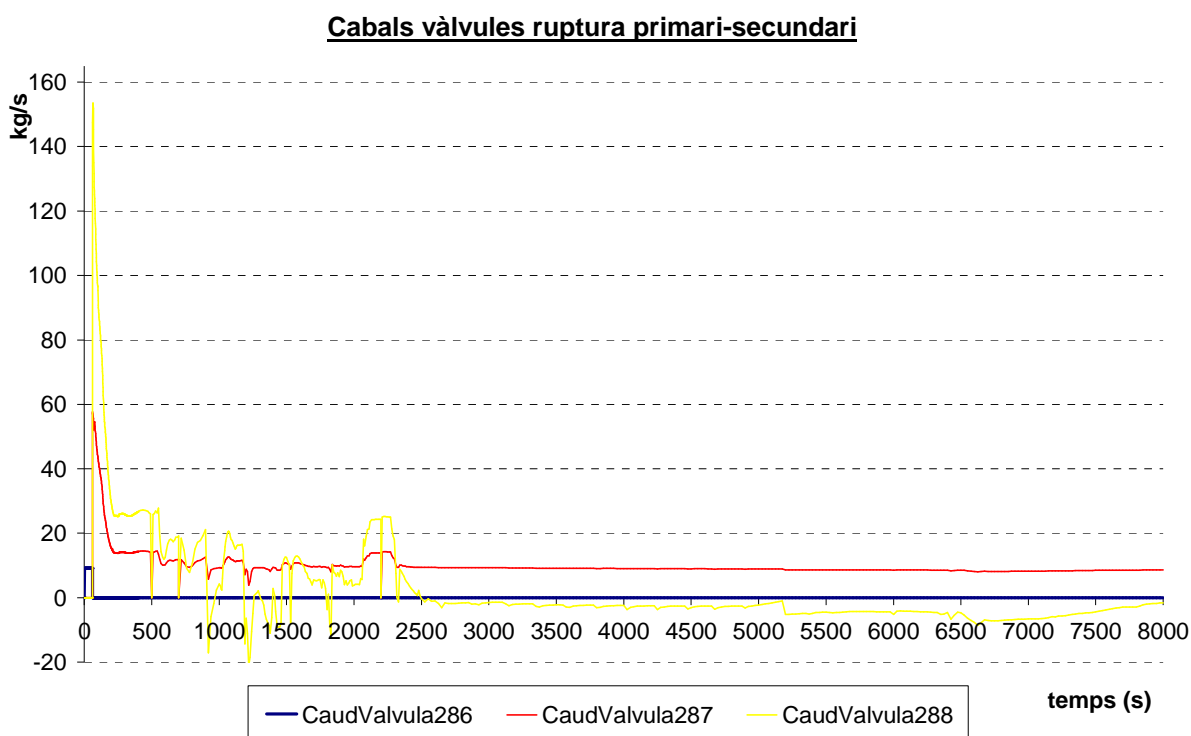


Gràfic 9-9: Pressió del PZR i dels GGv



Per tant, observant aquesta gràfica i les altres que es mostren en l'annex, es conclou que si en el cas de ruptura de 10 tubs, hi ha un error inicial de seguiment de les IOE, i no es realitza l'aturada de les bombes del refrigerant del reactor, no hi ha cap incident major, i tal com mostra la següent gràfica es redueix el cabal de fuga (Gràfic 9-10).

Cal destacar que en aquest cas la massa total fugada es major que si es segueixen les IOE correctament, concretament en aquest cas és 94 tones, i en el cas amb l'aturada de les BRR son 76 tones.



Gràfic 9-10: Cabals zona ruptura del GV afectat

A més, s'observa que la realització de la última acció d'aquest cas és als 2330 segons, mentre que en l'escenari en que s'aturen les BRR es finalitza als 1680 segons, per tant es guanyen aproximadament 10 minuts de temps. Mirar la taula cronològica de les accions d'aquest cas en l'annex.



9.5. Conclusions del transitori de ruptura de 10 tubs

L'anàlisi de ruptura de múltiples tubs en un generador de vapor, demostra que seguint les instruccions d'operació d'emergència correctament s'arriba a un transitori estabilitzat. En el qual s'ha reduït el cabal de fuga mitjançant la igualació de pressions entre el primari i el generador de vapor afectat. Alhora que no arriba a omplir-se el GV amb ruptura de tubs, degut a que les operacions són molt més ràpides en el temps, i per tant no hi ha perill de sobreiximent de líquid per la vàlvula d'alleujament d'aquest.

Una de les diferències importants respecte el trencament d'un tub, és que inicialment el nivell del GV afectat augmenta molt ràpidament, i per tant és molt més fàcil i ràpid identificar la causa d'aturada del reactor, podent reaccionar més ràpidament.

Com a conclusió, destacar que la massa total transferida del primari al secundari és de aproximadament 76 tones, i en la ruptura d'un tub de l'ordre de 66 tones, per tant, tot i que l'àrea de ruptura sigui 10 vegades més gran, la massa transferida és del mateix ordre de magnitud que la d'un tub.

També remarcar que amb la comparativa realitzada, entre l'escenari amb tancament de les bombes de refrigerant del reactor i en el que no es tanquen, s'ha observat, que els dos casos duen a condicions d'estabilitat, però seguint les IOE s'obté una massa fugada menor, i un major marge d'operació, per tant es conclou que seguint els passos correctament s'obté unes condicions més segures.



9.6. Arxius

Cas seguint correctament les IOE (sense BRR):

Nom de l'arxiu	Contingut
ANA0404Ma.inp	Model de la planta Ascó (estacionari)
estANA0404Ma.rst	Fitxer de resultats de l'estacionari
10tubs_sbrr0.inp 10tubs_sbrr1.inp 10tubs_sbrr2.inp 10tubs_sbrr.inp	Fitxers d'entrada (input)
10tubs_sbrr0.out 10tubs_sbrr1.out 10tubs_sbrr2.out 10tubs_sbrr.out	Fitxers de sortida (output)
10tubs_sbrr0.rst 10tubs_sbrr1.rst 10tubs_sbrr2.rst 10tubs_sbrr3.rst	Fitxers de resultats
10tubs_sbrr.xls	Fitxer de gràfiques

Cas seguint les IOE de ruptura d'un sol tub:

Nom de l'arxiu	Contingut
10tubs_0.inp 10tubs_1.inp 10tubs_2.inp 10tubs_3.inp	Fitxers d'entrada (input)
10tubs_0.out 10tubs_1.out 10tubs_2.out 10tubs_3.out	Fitxers de sortida (output)
10tubs_0.rst 10tubs_1.rst 10tubs_2.rst 10tubs_3.rst	Fitxers de resultats
10tubs.xls	Fitxer de gràfiques



10. Anàlisi de la influència del temps d'inici de l'obertura de les dutxes del pressionador en un SGTR

10.1. Introducció

L'objectiu del càlcul és estudiar la influència que té el temps en el qual es realitza el pas 17 de la IOE E-3, obertura d'una dutxa del pressionador a ritme màxim, sobre els paràmetres del sistema en un transitori de ruptura de tubs en un generador de vapor.

Per estudiar aquesta influència s'han realitzat 8 transitoris amb diversos temps d'activació, amb l'objectiu de trobar el temps màxim de retard, que igualment porti la central a condicions d'estabilitat.

10.2. Descripció de l'escenari

Per a la realització d'aquest anàlisi, s'ha partit de les condicions de la planta en els 1750 segons, just després de la finalització del refredament del sistema de refrigerant del reactor, mitjançant l'obertura de les vàlvules d'alleujament dels generadors de vapor intactes.

En el cas base, també inclòs en l'anàlisi, es va considerar que el temps de realització de l'obertura de dutxes seria als 1900 segons, 150 segons després de l'última acció. Els temps imposats per a l'obertura dels altres casos estudiats responen al interès en trobar el màxim retard possible, fent iteracions fins a trobar-lo.

La finalització de les dutxes estarà supeditada al compliment de les condicions que imposa la IOE E-3, en el pas 17 (es poden trobar en l'apartat 8.2, en la pàgina 37). Per a la comprovació del compliment de les condicions establertes i tancament de la dutxa normal del pressionador s'usa el controlador creat per aquest fi, amb un retard establert en el temporitzador de 60 segons des de l'instant en que es compleixen les condicions.



10.3. Hipòtesis

Per tal de realitzar una discriminació entre els casos en que el retard du a condicions segures, s'han establerts dos criteris bàsics:

- Reducció del cabal de fuga.
- Sobreeiximent màxim permès de líquid per les vàlvules d'alleujament del generador de vapor afectat del 3% del cabal nominal d'aquestes.

El cabal nominal de les vàlvules d'alleujament dels generadors de vapor és de 25 kg/s, per tant el màxim de líquid que pot sobreïxi per elles es de 0,75 kg/s. Cal matisar, que s'observarà el líquid que sobreïxi per elles, no el vapor, ja que el criteri pretén no acceptar com a vàlids aquells escenaris en que el generador de vapor estigui tan ple de líquid que surti per les PORV.

Aquestes condicions s'establiran en un transitori de 8000 segons, ja que aquest temps es creu suficient per adonar-se de l'error, i poder realitzar accions correctives.

Per evitar confusió en els resultats, les accions posteriors al tancament de les dutxes s'han realitzat amb unes diferències de temps igual al del cas base, per tant, 200 segons després de la finalització de la despressurització s'inicia el tancament de la injecció de seguretat.

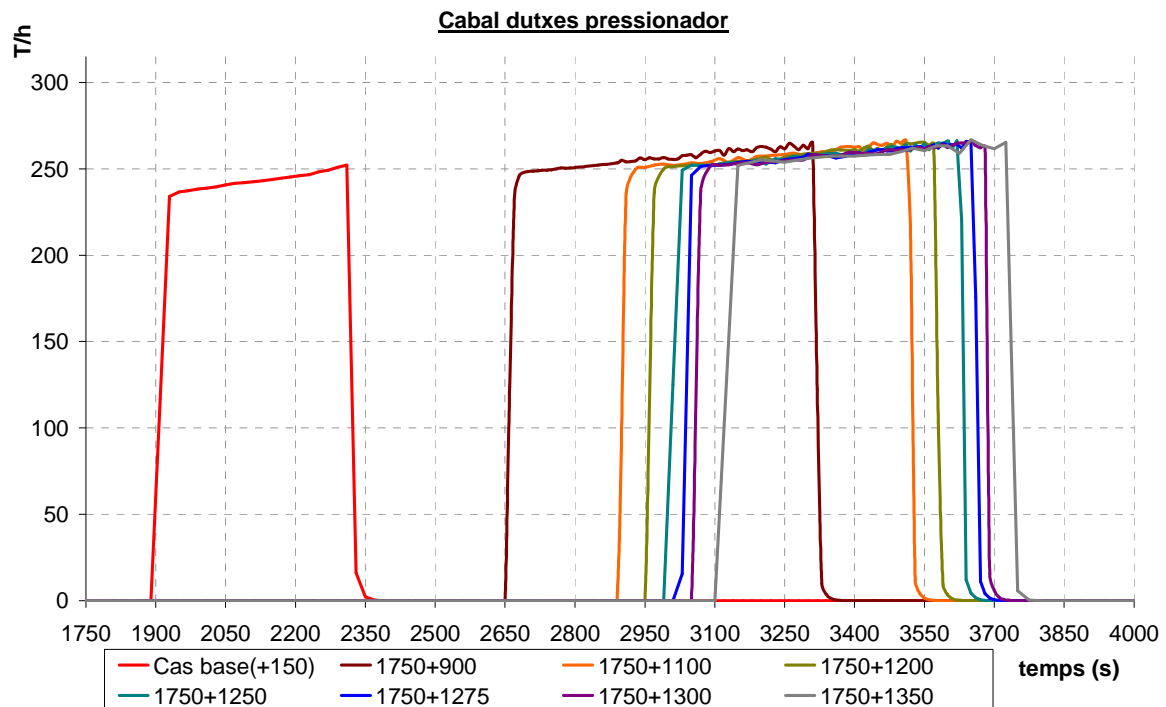
10.4. Anàlisi de les seqüències

Totes les seqüències realitzades segueixen les accions del cas base fins als 1750 segons, per tant no es mostraran els detalls anteriors a aquest temps. Primerament es presenta una taula amb els temps de les accions corresponents a cada seqüència (Taula 10-1):



t inici dutxes		t fi dutxes	t fi 1º HPI	t fi 2º HPI	Reposició carga
1750+150	1900	2320	2520	2550	2580
1750+900	2650	3310	3510	3540	3570
1750+1100	2850	3520	3720	3750	3780
1750+1200	2950	3580	3780	3810	3840
1750+1250	3000	3620	3820	3850	3880
1750+1275	3025	3680	3880	3910	3940
1750+1300	3050	3690	3890	3920	3950
1750+1350	3100	3725	3925	3955	3985

Taula 10-1: Cronologia accions diferents seqüències estudi dutxes



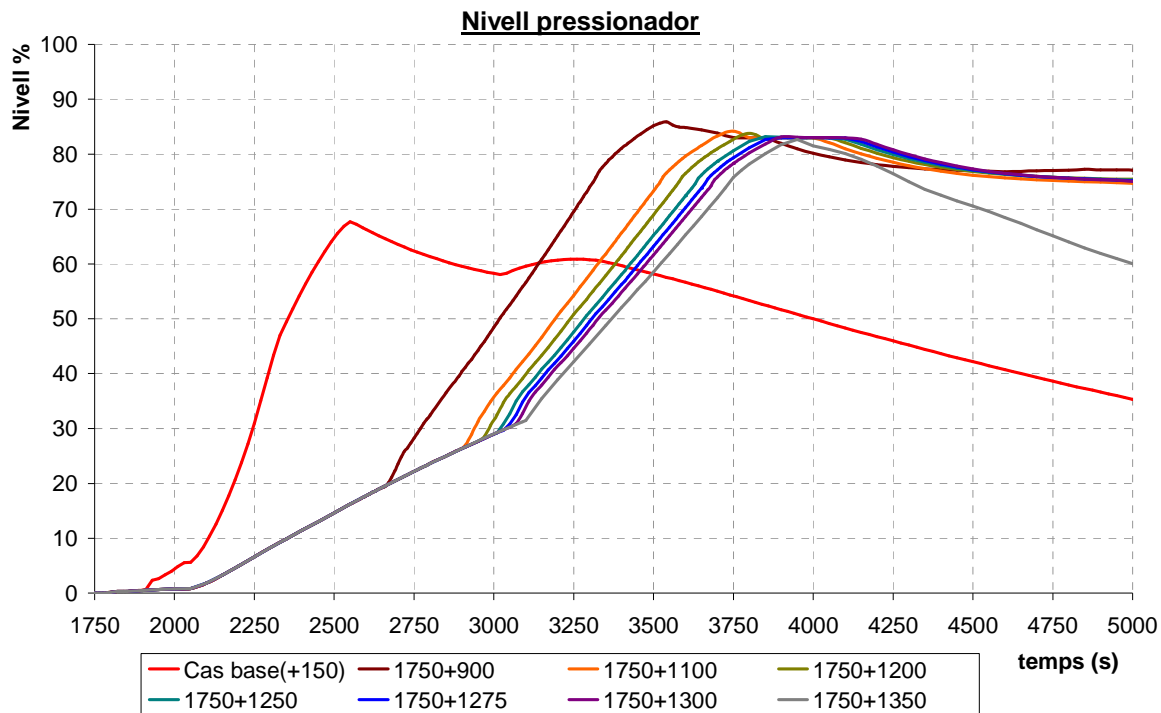
Gràfic 10-1: Cabal dutxa normal del PZR

Observant la gràfica del cabal de les dutxes del pressionador (Gràfic 10-1), es pot comprovar els temps d'obertura i tancament d'aquestes. Els temps que es mantenen obertes no guarda cap relació amb el retard experimentat, i són molt properes entre elles, oscil·lant entre els 620 i 670 segons per a les seqüències a partir d'un retard de 900 s.

En canvi el cas base si que resta menys temps obert, exactament 420 segons. Aquest fet és degut a que en el cas base tanca perquè compleix la condició de disminuir la pressió del



primari per sota de la del GV amb ruptura, mentre que els altres casos degut a que assoleixen un nivell en el pressonador superior al 70%, tal i com es pot comprovar en la següent gràfica (Gràfic 10 -2).

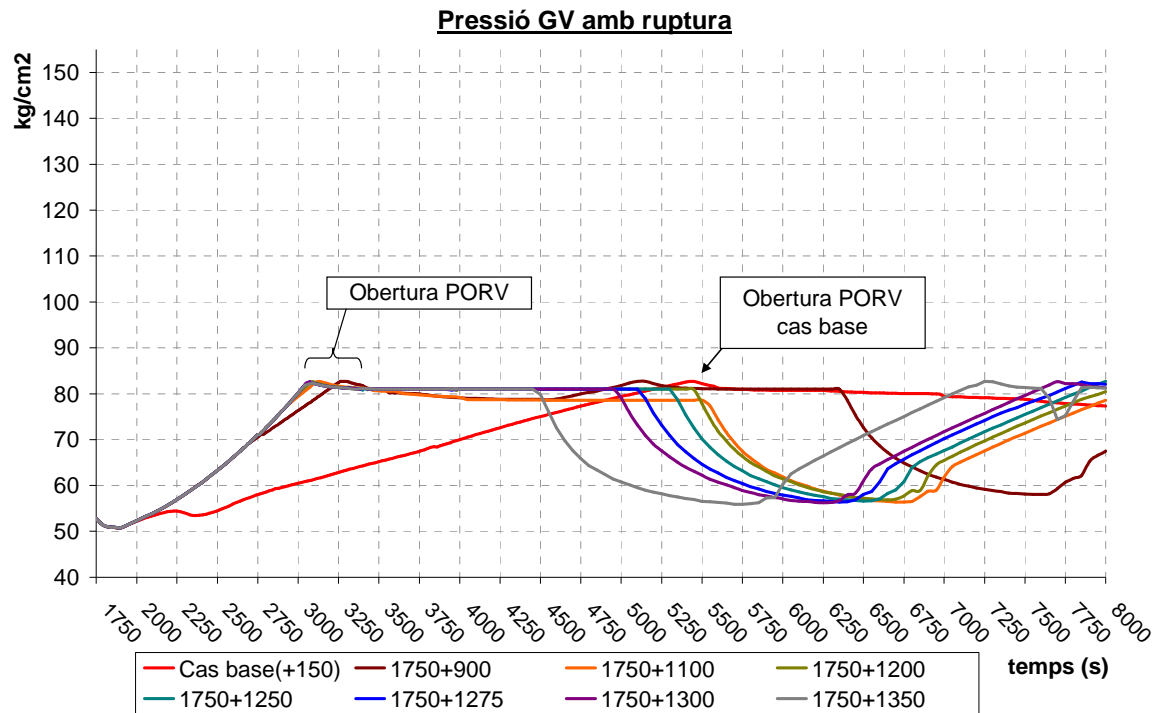


Gràfic 10 -2: Nivell del pressonador (detall)

Les diferents seqüències que reben la senyal de tancar les dutxes quan assoleixen un nivell del 70%, tal i com es pot comprovar en la gràfica 10-2, arriben a assolir un nivell proper al 83% degut al retard que s'imposa en el tancament de les dutxes, i a la pròpia inèrcia la vàlvula de la dutxa a ser tancada.

L'acció de l'obertura de les dutxes, a part de l'augment de nivell del pressonador ja comentat, afecta principalment a la pressió del primari, fent una despressurització a un ritme molt elevat, com es pot observar en el següent gràfic (Gràfic 10-3).



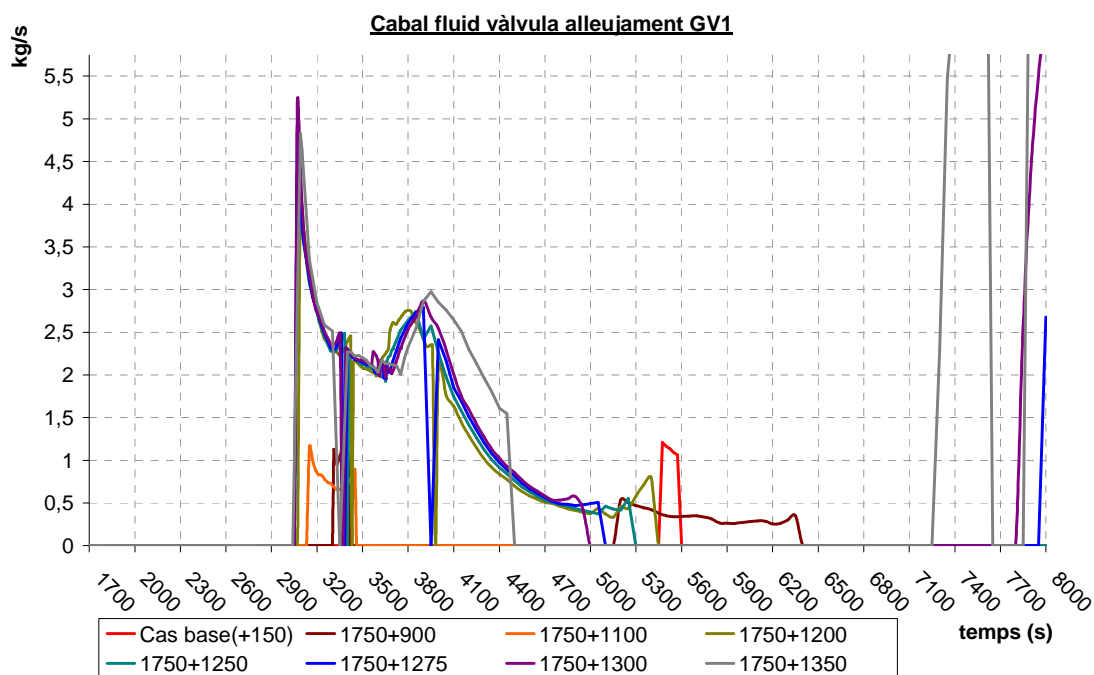


Gràfic 10-3: Pressió del generador de vapor afectat

Tal i com ja s'ha comentat únicament en el cas base, la pressió del primari disminueix per sota del generador amb ruptura, originant que la fuga sigui en sentit contrari, i a la vegada modificant la pressió del GV1. En els altres casos, la pressió del GV afectat, no es veu modificada per aquest pas (mirar Gràfic 10-3), arribant a assolir la pressió de tarat de la vàlvula d'alleujament, 81 kg/cm², i per tant originant que aquesta s'obri expulsant vapor (Gràfic 10 -4).

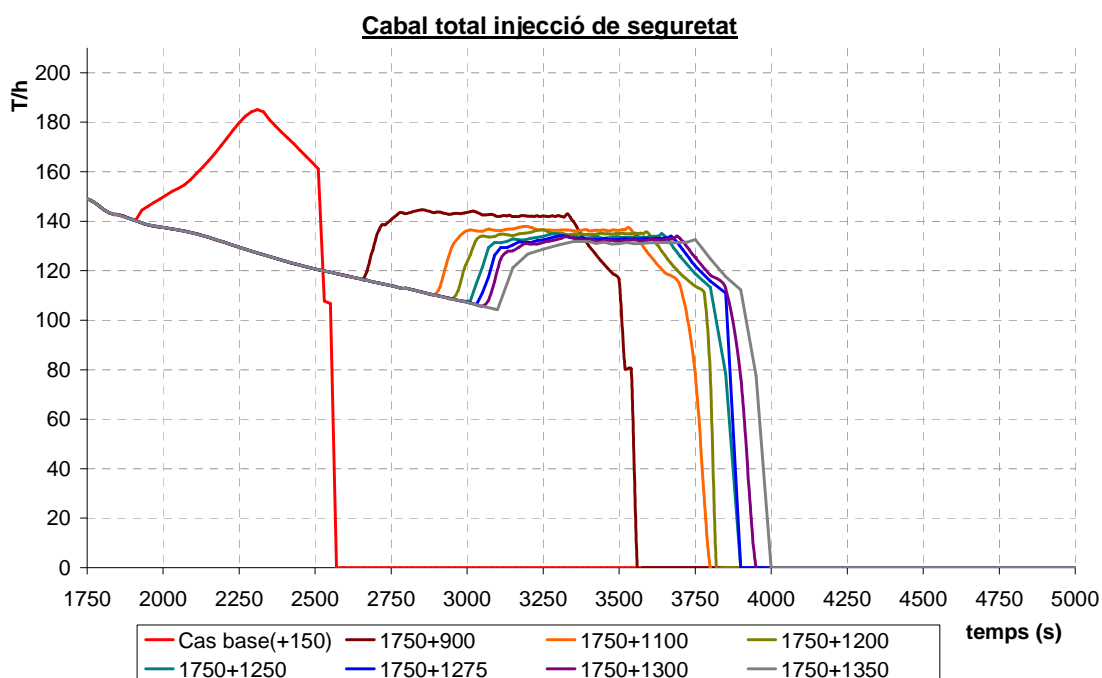
En el cas base, el GV també arriba a assolir els 81 kg/cm, i per tant també sobre la vàlvula, però el vapor que alleuja es molt menor.





Gràfic 10 -4: Cabal alleujament GV 1

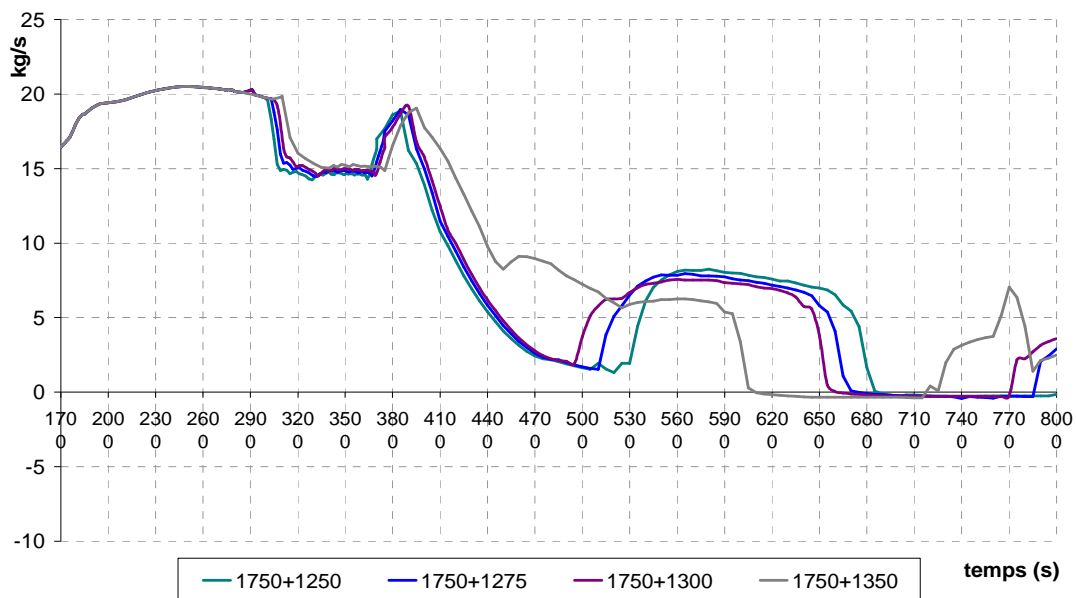
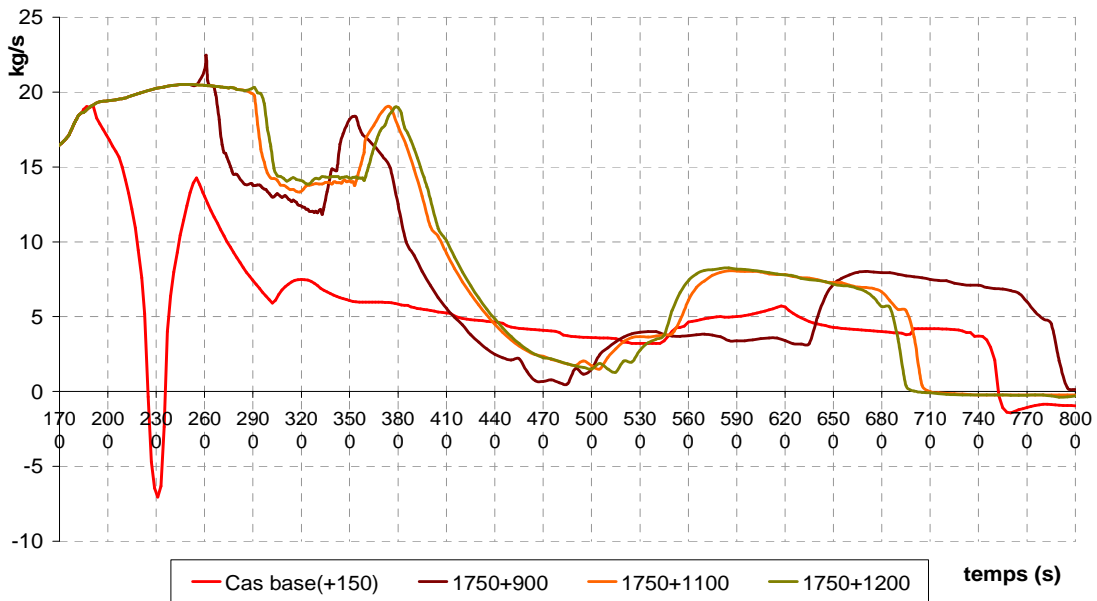
Com ja s'ha comentat anteriorment, la finalització de la injecció de seguretat es realitza 200 segons després de l'ordre de tancament de les dutxes (veure Gràfic 10 -5), per tant, quan més tard es tanquin les dutxes, més cabal de seguretat s'injectarà al sistema.



Gràfic 10 -5: Cabal injecció de seguretat



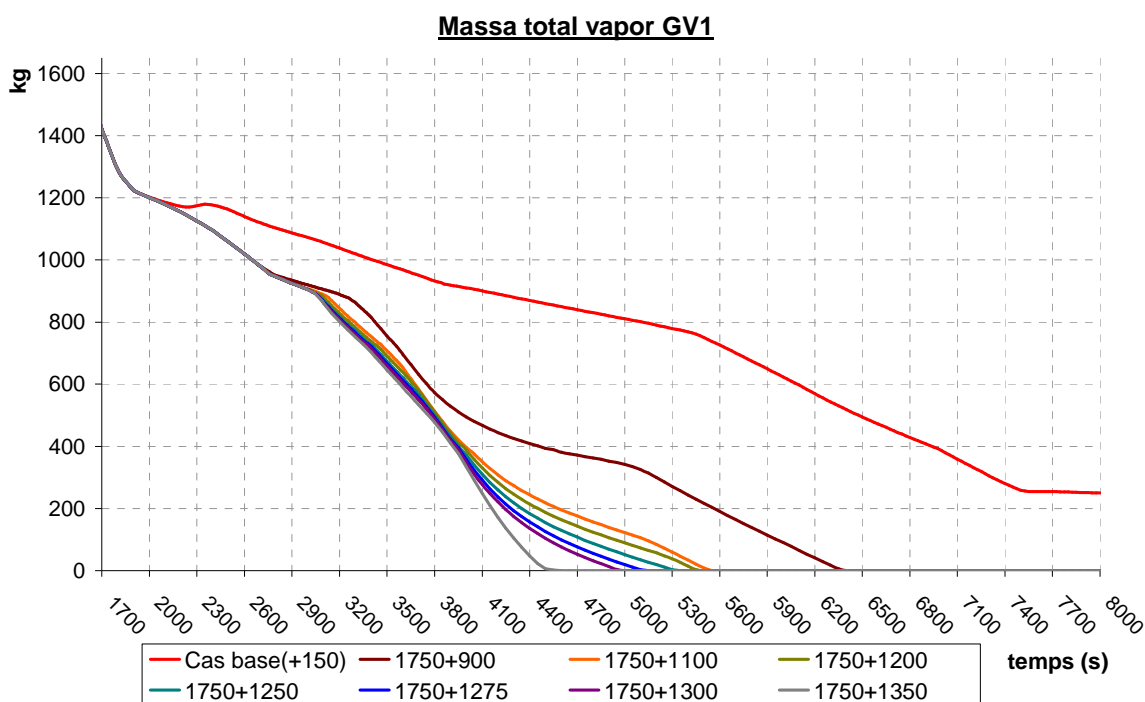
La finalització de la injecció de seguretat també disminueix la pressió del primari, per tant, quan més tard es tanqui, les pressions del primari i del GV afectat tardaran més a aproximar-se. Aquest fet, sumat als efectes ja comentats, origina que el cabal que es transvasa del primari al secundari sigui més gran quan més es retarda l'obertura de dutxes. Es mostra a continuació el cabal de la ruptura total, sumant el cabal de la ruptura zona tub i zona caixa d'aigües (Gràfic 10 -6 i Gràfic 10 -7). (S'ha preferit mostrar-ho en dos gràfiques, amb 4 escenaris a cada una, per millorar la visibilitat)



Cal matisar que l'augment de cabal que durant un període de temps experimenten els transitoris aquí exposats (d'inici entre els 5000s i els 6300s, depenent del retard aplicat), es degut a la baixada de pressió del generador de vapor afectat (és pot observar en el Gràfic 10-3), Aquesta disminució de cabal es provocada per l'obertura de les vàlvules d'alleujament del GV afectat, que tanquen quan la pressió disminueix del seu tarat.

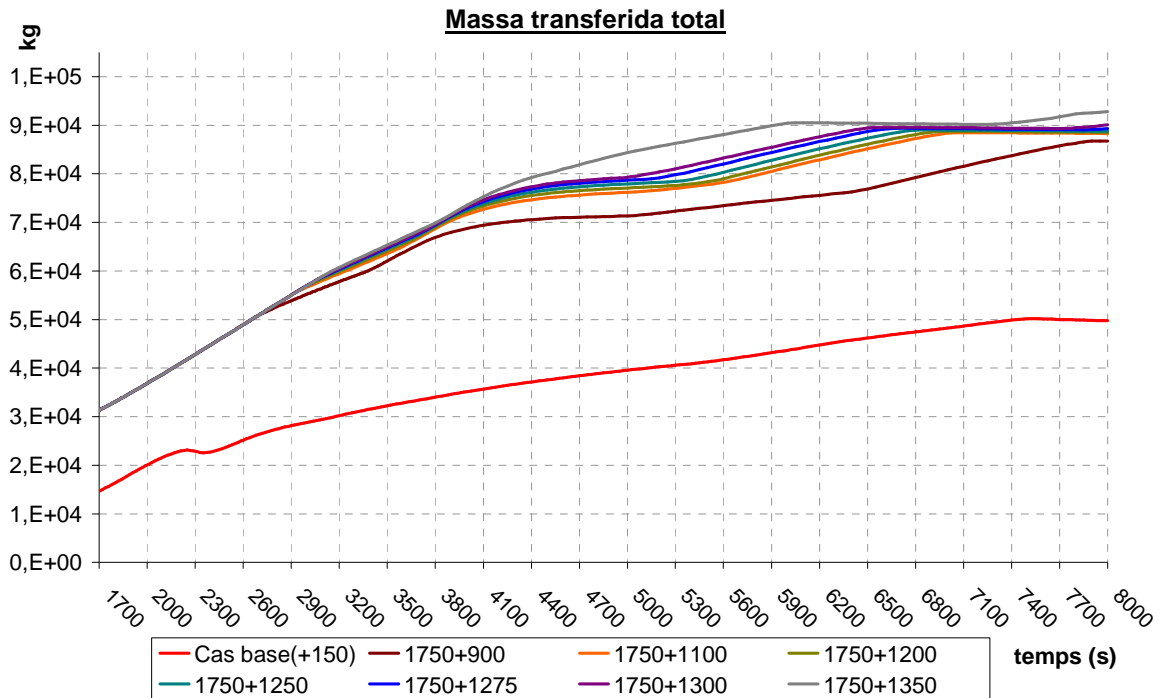
L'obertura de les vàlvules d'alleujament fa que, en els casos amb retard, hi hagi una sortida de tot l'inventari de vapor, quedant en el seu interior només líquid (mirar Gràfic 10 -8), de manera que experimenten una disminució de pressió accelerada.

Aquesta disminució de pressió del GV afectat es seguida per la pressió del primari, aconseguint així reduir la diferència de pressions entre aquests dos sistemes i assolint una altra vegada la minimització del cabal.



Gràfic 10 -8: Massa vapor en el secundari del GV1



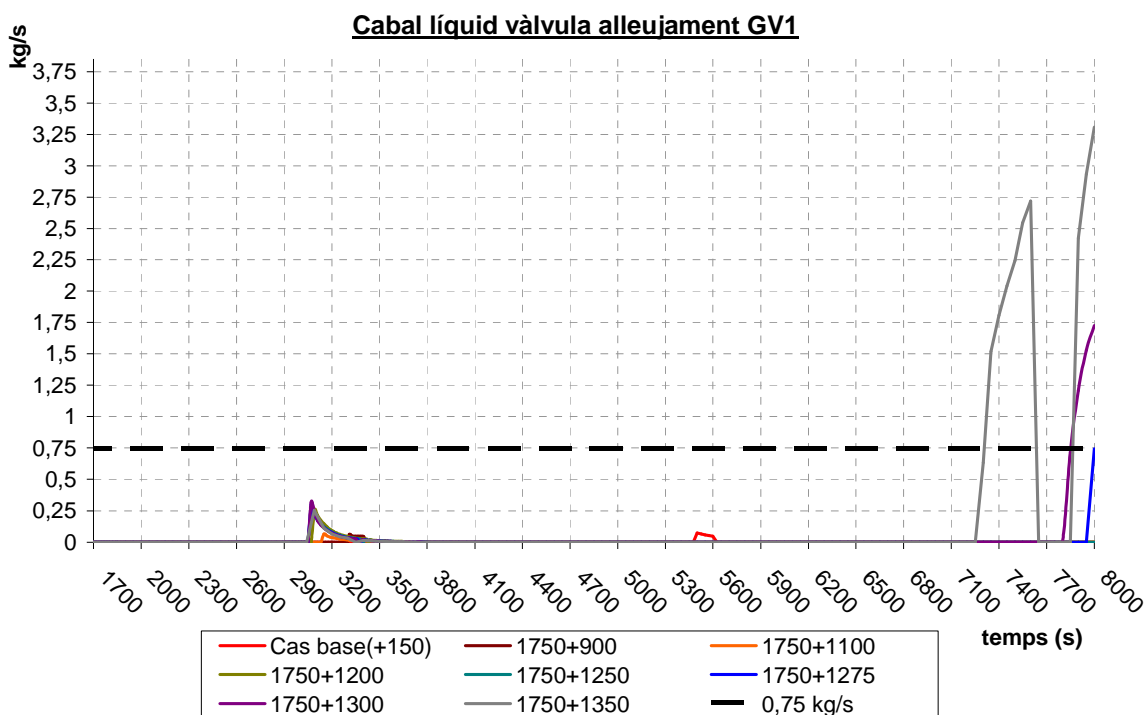


Gràfic 10 -9: Massa total transferida primari-secundari

Observant la última gràfica (Gràfic 10 -9), podem comprovar que en tots els casos arribem a una estabilització de la massa que fuga. Per tant arribem a minimitzar el cabal primari-secundari. Si es miren els gràfics anteriors (Gràfic 10 -6 i Gràfic 10 -7), es veu que hi ha alguns escenaris que sembla que el cabal augmenti, però s'ha comprovat, amb extensions d'aquests escenaris, que realment al final tots els transitoris arriben a assolir un cabal mínim.

Analitzant l'altra condició establerta, que no hi hagi més de 0,75 kg/s que sobreixin per la vàlvula d'alleujament del generador de vapor amb ruptura (Gràfic 10-10), es detecta que no tots els casos ho compleixen, per tant aquesta serà la variable discriminatòria entre els transitoris vàlids i no vàlids.





Gràfic 10-10: Cabal líquid alleujament GV1

Clarament, en els casos amb un retard de 1300 i 1350, hi ha una obertura de la vàlvula d'alleujament que emet més del 3% del cabal nominal, corresponent als 0,75 kg/s senyalats en la gràfica.

En la gràfica 10-10, no es pot observar, però l'escenari amb un retard de l'obertura de dutxes de 1275 segons, no arriba a emetre el cabal màxim permès, encara que s'hi ajusta molt, 0,74 kg/s, és per això que es considerarà aquest com el cas crític de retard acceptable.

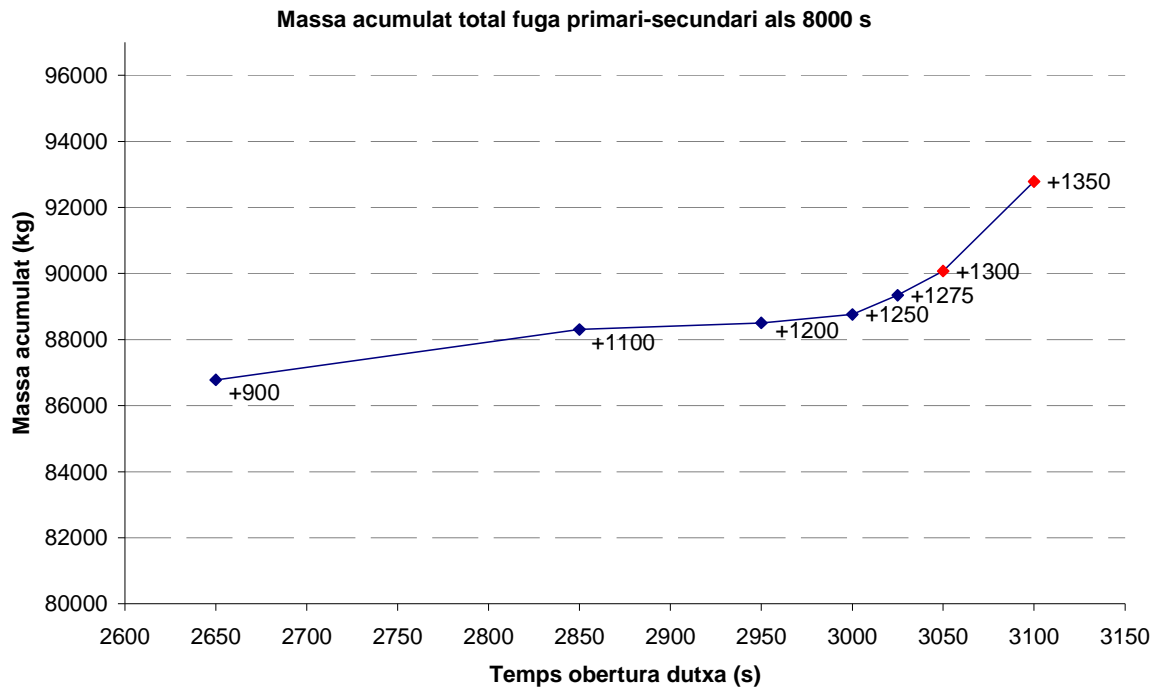
10.5. Conclusions del temps d'actuació de les dutxes

El temps d'activació de la dutxa del pressonador en un cas de ruptura de tubs, és un paràmetre fonamental, ja que un retard elevat pot ocasionar el sobreiximent de líquid (mescla del secundari i primari) per les vàlvules d'alleujament del generador de vapor amb ruptura.

No obstant també s'ha comprovat, que la minimització del cabal de fuga primari-secundari en aquest cas no es una restricció, ja que en tots els casos s'arriba a assolir una diferència de pressions primari-GV afectat suficientment baixa, que provoca que el cabal fugat al secundari sigui fàcilment reposat pel sistema de control volumètric.



Per altra banda cal senyalar que com menor sigui aquest retard, s'assoleix més ràpid una mínima diferència de pressions, i hi ha un menor temps injecció de seguretat. Concloent, les condicions finals de la planta seran millors, i menor serà el cabal del primari que haurà passat al generador de vapor. Tal i com es pot observar en la següent gràfica de la massa total transferida per cada seqüència (Gràfic 10 -11). No s'ha inclòs el cas base per una millor visualització, la massa final transferida d'aquest es de 66430 kg



Gràfic 10 -11: Massa total transferida als 8000 s

Com a conclusió final observar que el màxim retard permisible és de 1275 segons, i que en tots els escenaris s'ha arribat a l'estabilització del cabal de fuga, però la disminució d'aquest retard al mínim possible facilitarà les accions de parada, degut a la menor pèrdua de refrigerant del reactor.

10.6.Arxiu

Per qüestions d'espai en aquesta memòria la relació dels arxius usats es troba en l'annex.





11. Anàlisi de la influència dels temps d'aturada de la injecció de seguretat en un SGTR

11.1.Introducció

L'objectiu del càlcul és estudiar la influència que té el temps en el qual s'inicia la maniobra de finalització de la injecció de seguretat, sobre els paràmetres del sistema en un transitori de ruptura de tubs en un generador de vapor.

Per estudiar aquesta influència s'han realitzat 12 transitoris amb diversos temps de finalització, amb l'objectiu de trobar el temps màxim de retard que igualment porti la central a condicions d'estabilitat. Per raons de millorar la presentació dels resultats només es presentaran 8 d'ells.

11.2.Descripció de l'escenari

Per a la realització d'aquest anàlisi, s'ha partit de les condicions de la planta en els 2320 segons del cas base, després de la finalització del pas 17, la disminució de la pressió del sistema del refrigerant del reactor mitjançant l'obertura d'una de les dutxes del pressionador.

En el cas base, també inclòs en l'anàlisi, es va considerar que el temps d'inici de la maniobra de finalització de la injecció era als 2520 s, 200 segons després de l'aturada de les dutxes. Els temps imposats per a l'obertura dels altres casos estudiats responen al interès en trobar el màxim retard possible, fent iteracions fins a trobar-lo.

11.3.Hipòtesis

Les hipòtesis seguides per a la discriminació, són les mateixes que en l'anàlisi de la influència del temps d'obertura de les dutxes, i es poden trobar en l'apartat 10.3.

El retard que s'imposa és sobre el tancament de la primera bomba de la injecció de seguretat, i per evitar confusió en els resultats, la segona bomba es tancarà, en tots els escenaris, 30 segons després de la primera.

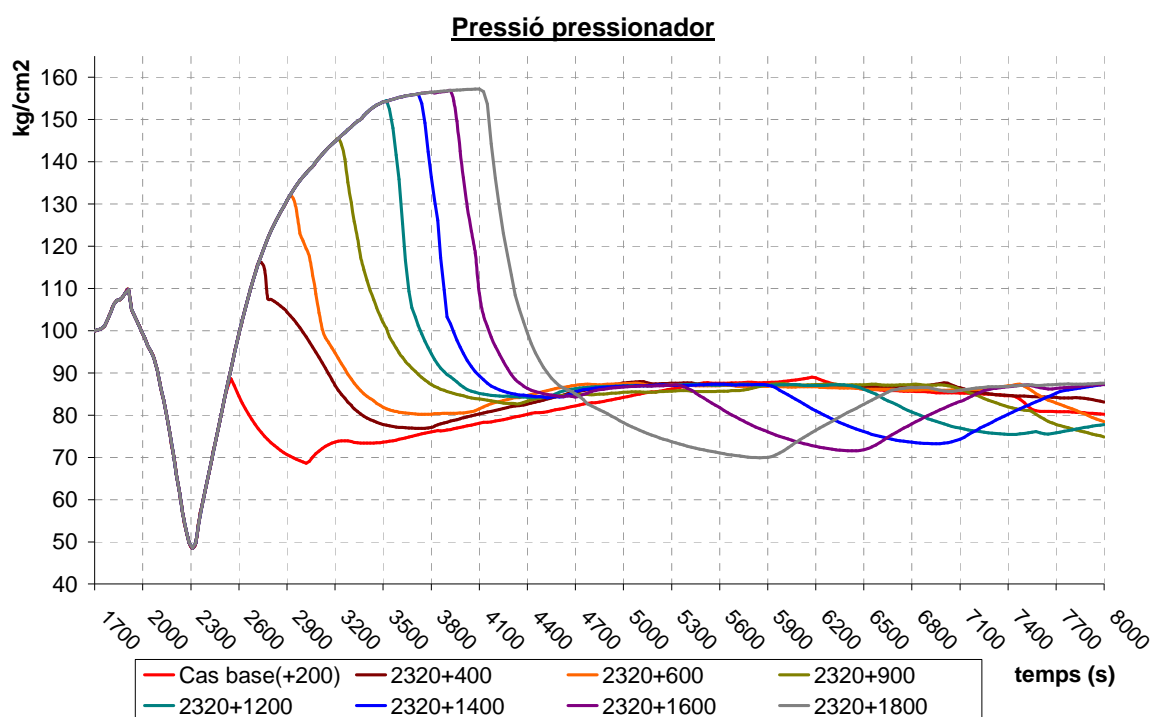


11.4. Anàlisi de les seqüències

Primerament es mostra una taula amb les vuit seqüències que s'exposaran a continuació amb la relació de temps que tindran les accions posteriors respectivament (Taula 11-1).

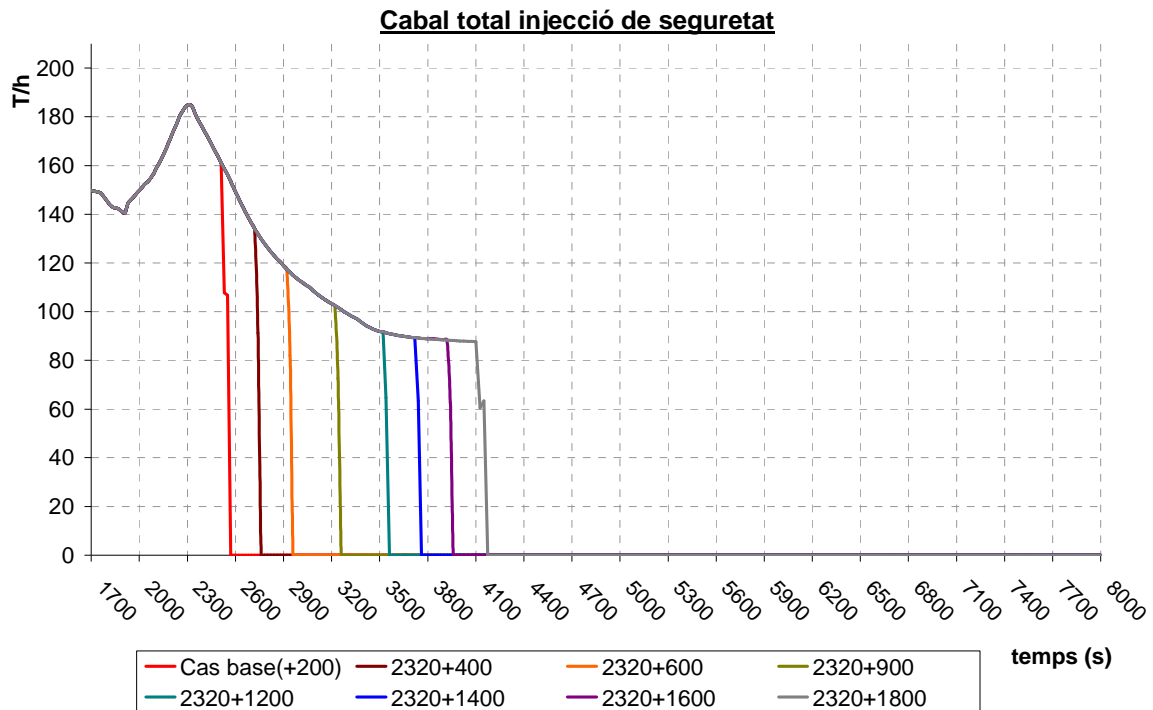
t fi 1º HPI		t fi 2º HPI	Reposició carga
2320+200	2520	30	230
2320+400	2720	30	230
2320+600	2920	30	230
2320+900	3220	30	230
2320+1200	3520	30	230
2320+1400	3720	30	230
2320+1600	3920	30	230
2320+1800	4120	30	230

Taula 11-1: Cronologia accions diferents seqüències estudi dutxes



Gràfic 11 -1: Pressió del pressionador





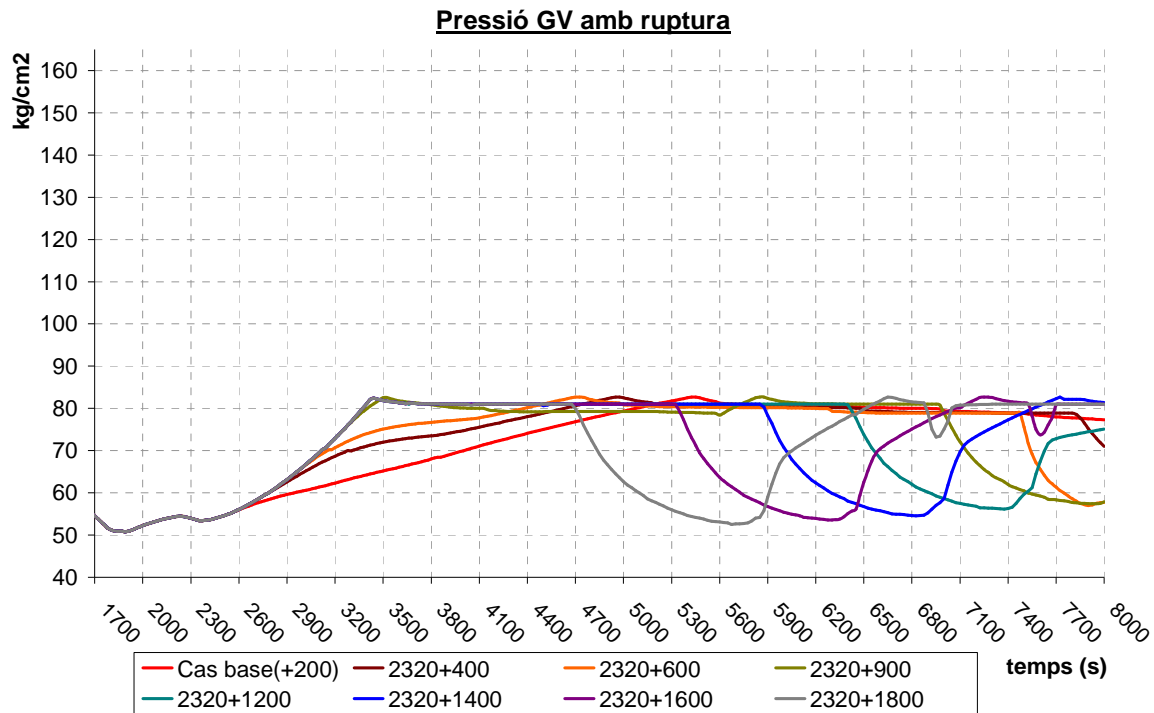
Gràfic 11 -2: Cabal total de la injecció de seguretat

En els 2320 segons s'aturen les dutxes, en aquell moment la pressió en el primari comença a augmentar (veure Gràfic 11 -1), i per tant, la injecció de seguretat d'alta pressió ha d'injectar contra un sistema cada vegada a més pressió, i llavors aporta menys cabal (veure Gràfic 11 -2).

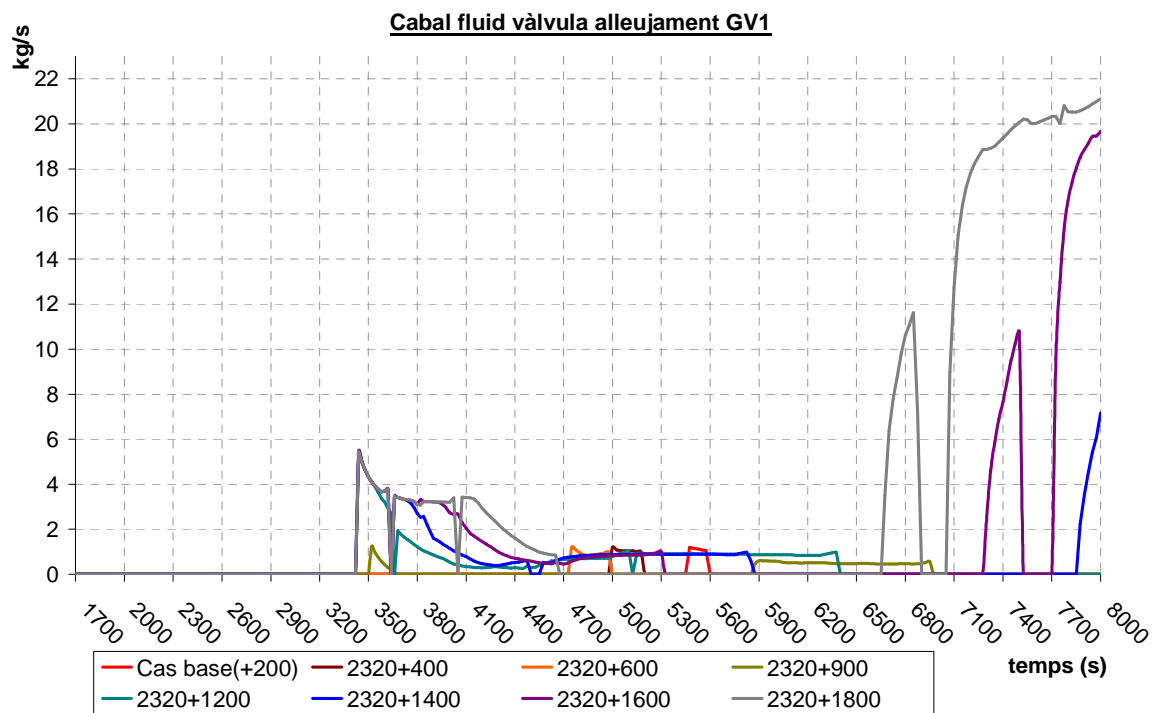
És en aquest punt de l'augment de la pressió, quan es realitzen els diferents escenaris de finalització de la injecció de seguretat, amb l'objectiu de reduir la pressió del primari, i assolir una diferència de pressions amb el generador de vapor afectat el més petita possible per reduir el cabal que fuga.

Aquesta acció però, també té una influència, encara que més petita, en la pressió del generador de vapor afectat (Gràfic 11-3), fent que disminueixi lleugerament la seva tendència a seguir augmentant. Igualment però en tots els casos s'assoleix la pressió de tarat de les vàlvules d'alleujament fent que s'obrin en tots els transitoris simulats, tot hi això, amb diferent magnitud, sent els que experimenten major retard els que més cabal alleugen (Gràfic 11-4).



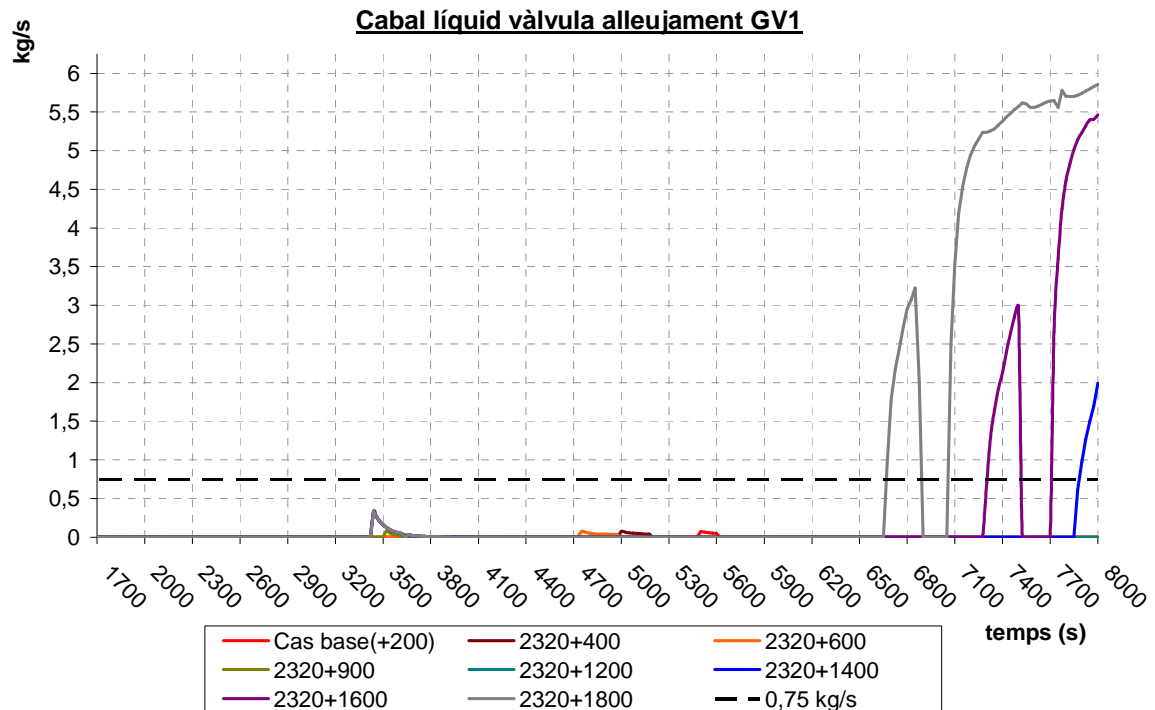


Gràfic 11-3: Pressió en el generador de vapor afectat



Gràfic 11-4: Cabal fluid vàlvula PORV del GV afectat





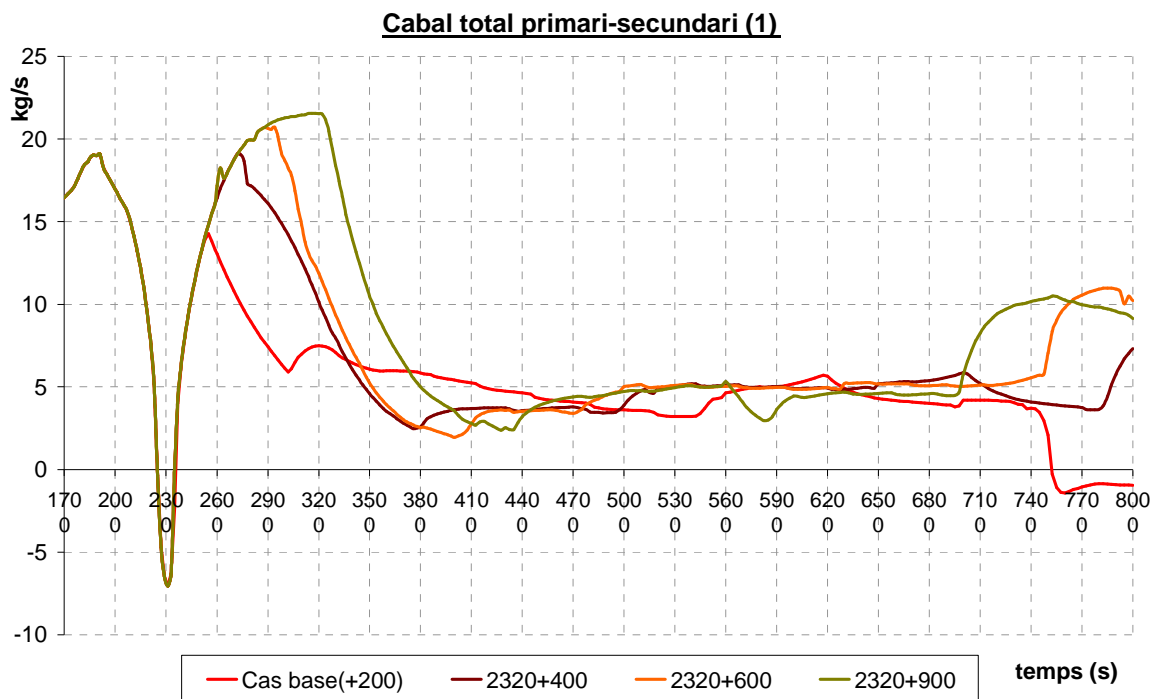
Gràfic 11-5: Cabal líquid vàlvula PORV del GV afectat

Comparant els dos gràfics anteriors (Gràfic 11-4 i Gràfic 11-5), comprovem que tot i que en tots els escenaris hi hagi una obertura de la vàlvula d'alleujament, només en els casos en que aquestes tornen a obrir a partir dels 6600 segons, hi ha un sobreiximent de líquid, indicant que el generador de vapor està ple de líquid.

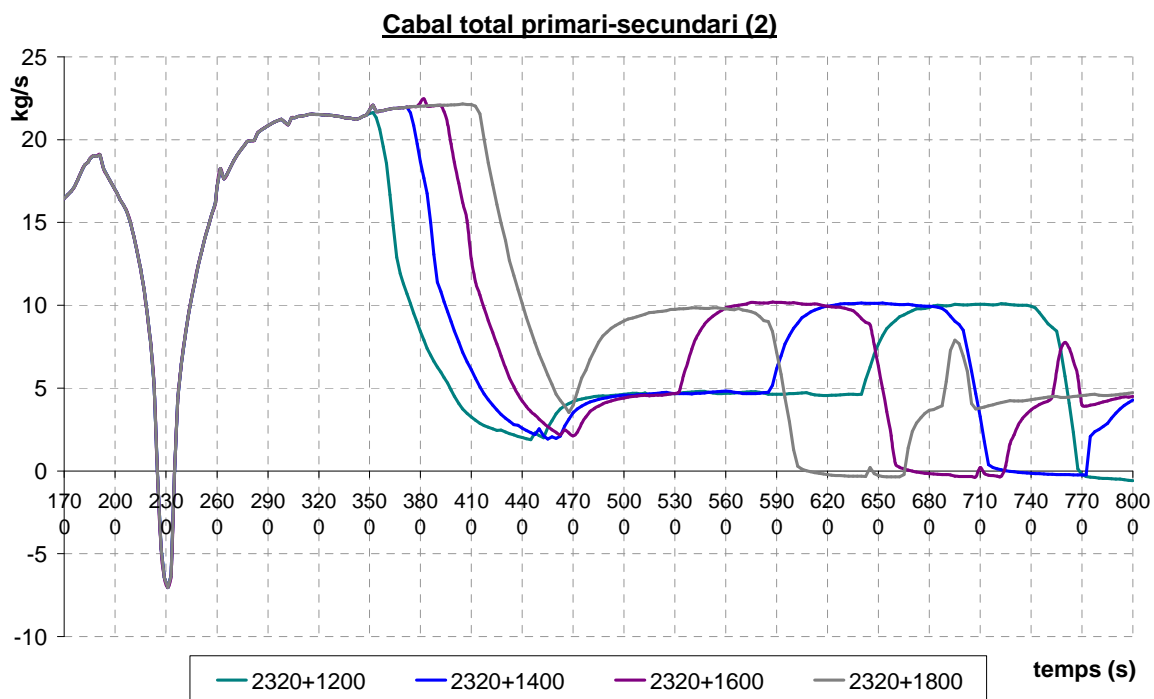
Per tant, el màxim retard acceptable, seguint el criteri indicat en les hipòtesis, és de 1200 segons després de la finalització de les dutxes en el cas base.

Per altra banda, hi ha el cabal de fuga del primari al secundari (Gràfic 10 -6 i Gràfic 10 -7) (per raons de millorar la visibilitat, s'ha preferit mostrar els resultats en dos gràfiques)





Gràfic 11-6: Cabal total fuga ruptura de tubs (1)

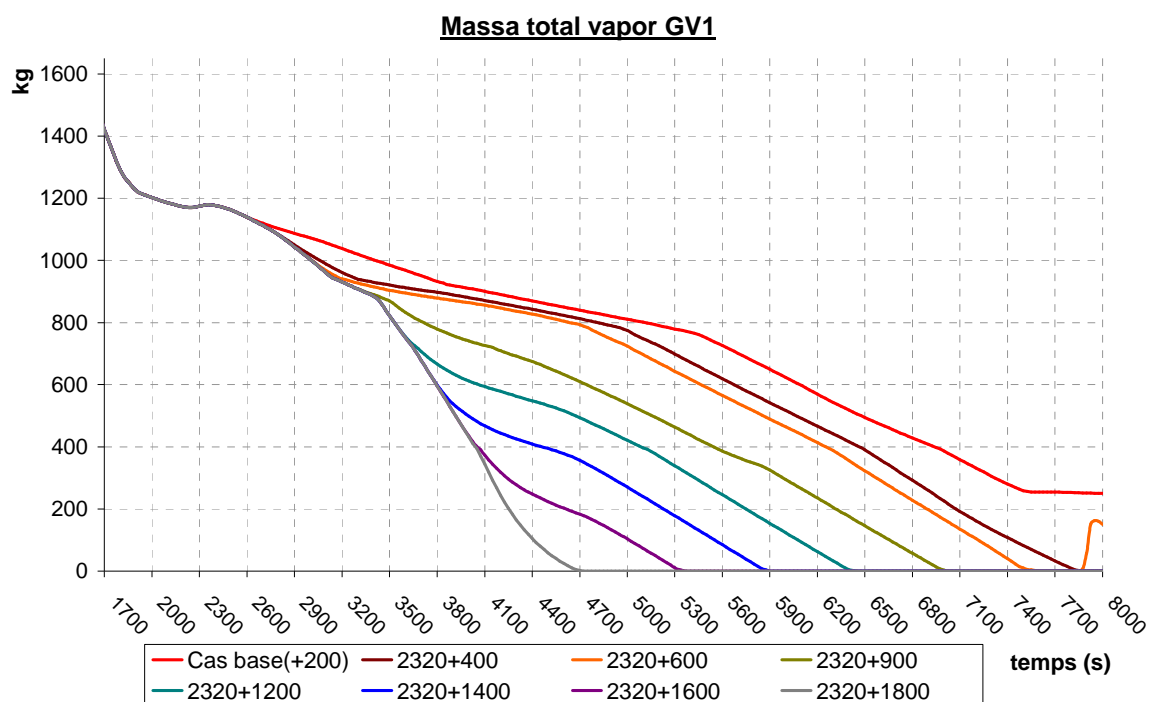


Gràfic 11-7: Cabal total fuga ruptura de tubs (2)



En aquest anàlisi també s'observa l'augment de cabal transferit en la fuga, en els últims instants del transitori, que com s'ha comentat en el cas de l'anàlisi de les dutxes es degut a l'efecte conjunt de l'obertura de les vàlvules d'alleujament i el buidat de vapor del GV per aquestes vàlvules.

Aquest fet provoca una disminució de la pressió del GV afectat fent que temporalment hi hagi un increment de la diferència entre les pressions del primari i el GV fent augmentar el cabal transferit. Tot hi això es comprova que posteriorment la pressió del primari segueix al secundari, i es redueix el cabal.



Gràfic 11-8: Massa vapor en el secundari del GV1

Igual que en el cas del retard en el temps d'activació, veiem que l'acció de finalització de la injecció de seguretat aconsegueix reduir el cabal que fuga del primari al secundari, per tant, no sent aquest criteri per discriminar els transitoris no vàlids.

Cal destacar que tot hi que en alguns escenaris pugui semblar que al final el cabal de ruptura augmenti (+400, +600 i +900), es només una inflexió transitòria. Posteriorment es redueix, tal i com es pot comprovar en seqüències amb retard posterior, que experimenten aquest augment

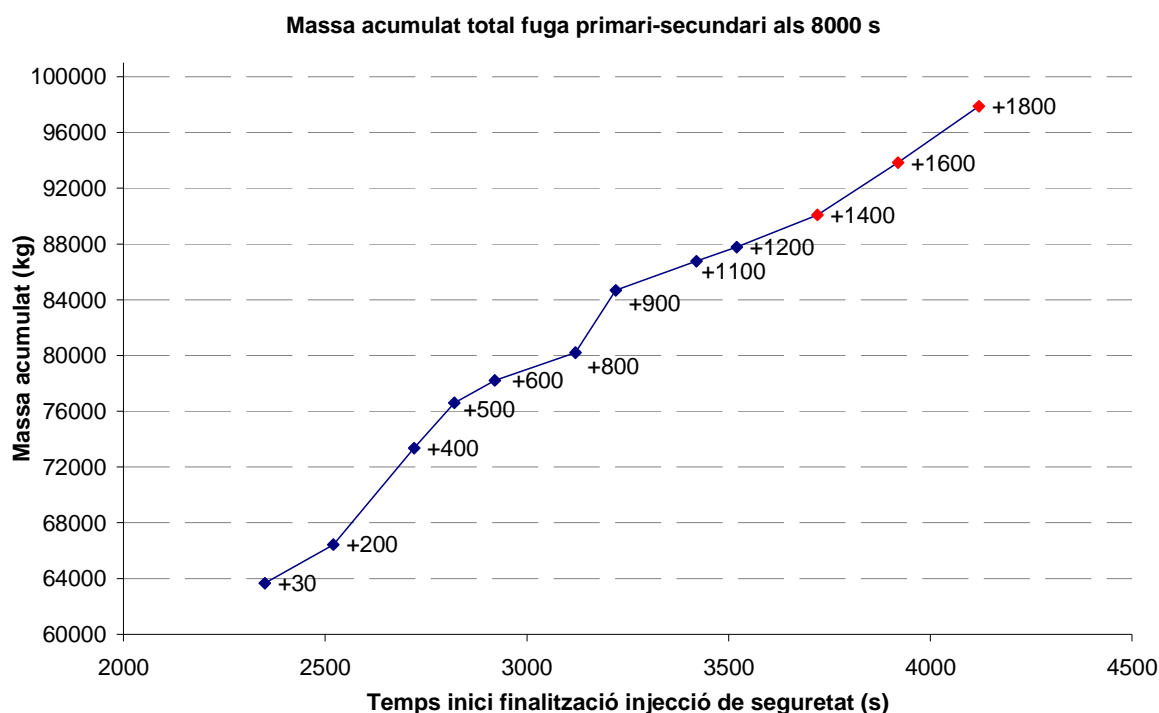


abans (+1200, +1400, +1600 i +1800) i totes elles aconseguixen reduir el cabal. Aquest fet s'ha demostrat amb allargaments dels transitoris, però per raons d'espai no s'ha cregut convenient afegir-ho. Les raons d'aquest augment estan exposades anteriorment, i són l'obertura de l'alleujament i que s'acaba l'inventari de vapor del GV afectat (Gràfic 11-8).

11.5. Conclusions del temps de finalització de la IS

El temps de finalització de la injecció de seguretat del sistema de refrigeració del reactor, en un cas de ruptura de tubs, és un paràmetre fonamental, ja que un retard elevat pot ocasionar el total ompliment del generador de vapor amb ruptura i posteriorment el sobreiximent de líquid (mescla del secundari i primari) per les vàlvules d'alleujament del generador de vapor amb ruptura.

Per altra banda, i coincidint així amb l'estudi del temps de retard en les dutxes, la minimització del cabal de la zona del tub trencat, no és una restricció. Dintre del interval estudiat, tots els casos convergeixen en la reducció d'aquest. Tot i això, si comprovem en el gràfic següent (Gràfic 11-9), la massa transferida total, s'observa que a major retard major massa transferida. Per tant és important aturar la injecció de seguretat el més ràpid possible.



Gràfic 11-9: Massa total transferida als 8000 s



El resultat final d'aquest anàlisi del temps de retard en la finalització de la injecció de seguretat és que el màxim acceptable és de 1200 segons, però que la minimització d'aquest temps es important, ja que a menors retard hi ha menor pèrdua de refrigerant del reactor, i a la vegada menor nivell del generador amb ruptura, paràmetres que afavoreixen les condicions d'estabilitat.

11.6.Arxiu

Per qüestions d'espai en aquesta memòria la relació dels arxius usats es troba en l'annex.





12. Conclusions

Aquest projecte ha ampliat i documentat la biblioteca de transitoris del Grup d'Estudis Termohidràulics amb diversos transitoris de ruptura de tubs.

S'ha estudiat el comportament de la planta en diversos escenaris, partint de la ruptura de tubs en un generador de vapor, l'únic lloc possible de comunicació de fluid entre primari i secundari. S'ha comprovat la idoneïtat dels sistemes de seguretat existents de la central, que aconseguixen dur-la a condicions per a una correcta refrigeració del reactor.

Alhora, s'ha verificat la gran utilitat de les Instruccions d'Operació d'Emergència existents que, tant en el cas de ruptura simple com múltiple de tubs, duen la planta a condicions d'estabilitat. Demostrant que són una eina molt valuosa per als operadors de la sala de control en cas d'incidències.

Pel que fa a les variables que intervenen en aquest transitori, s'ha estimat que en el retard de les dutxes, és té un temps de resposta de 1275 segons, i en el cas de la finalització de seguretat 1200 segons.

Per tant, i com a conclusió final, en l'escenari de ruptura simple de tubs és té un valor crític de temps de 1200 segons, que no hauria de ser superat, per a unes condicions determinades, per tal de no afectar a la integritat de la planta.



13. Agraïments

Voldria agrair en primer lloc l'ajuda del meu director de projecte, el sr. Francesc Reventós, sobretot pel seu bon humor en tot moment i dedicació quan ha estat necessari, donant per descomptat que el seu gran coneixement sobre la matèria ha estat imprescindible.

També vull donar les gràcies a la Carme Pretel, qui hem va donar la oportunitat de realitzar aquest projecte, i la d'aprendre moltes coses noves per mi sobre les centrals nuclears, l'energia nuclear, i l'energia en general.

M'agradaria destacar i donar les gràcies, ara que disposo d'aquestes línies, als grans amics que he "aconseguit" al realitzar aquesta carrera, i com no podia ser d'una altra manera també m'han ajudat en aquest projecte.

Gràcies també a tota la gent que hi ha, o ha passat, per la sala de becaris de la Secció d'Energia Nuclear durant el període que jo hi he estat. També a la gent que a estat a meu voltant: als amics del pis, a la gent de Mollerussa, als amics i amigues que he conegut aquí Barcelona...

Però sobretot, aquest Projecte Final de Carrera, esta dedicat als meus pares, que si per ells fos haurien estat amb mi "llençant" càlculs del Relap. Gràcies.



14. Bibliografia

- [1] IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY. RELAP5/MOD3.2 code manual volume II. User's guide and input requirements. Idaho Falls, Juny 1995.
- [2] LABORATORI D'ESTUDIS TERMOHIDRÀULICS, SECCIÓ D'ENGINYERIA NUCLEAR (UPC) *Nota de càlcul del model de la C.N. Ascó I-II amb el codi RELAP/MOD3.2*. Barcelona, Març 2003.
- [3] VIRTUAL NUCLEAR TOURIST.

[<http://www.nucleartourist.com/>; 1 de febrer 2007]
- [4] ANAV. *Manual de procedimientos de la dirección de central nuclear de Ascó. IOE-E-0 Disparo del reactor y/o inyección de seguridad, rev. 1F*. 11/08/05
- [5] ANAV. *Manual de procedimientos de la dirección de central nuclear de Ascó. IOE-E-3 Rotura de tubos en un generador de vapor, rev. 1F*. 20/08/05
- [6] ANAV. *Manual de procedimientos de la dirección de central nuclear de Ascó. IOE-ES-1.5 Secuencia de reducción de inyección de seguridad en fase de recirculación a ramas frías, rev. 1C*. 04/05/04
- [7] ANAV, APS i TERMOHIDRÀULICA, *Informe R_RTU_09*.

Bibliografia complementària

TANARRO SANZ, A.; TANARRO ONRUBIA, A. *Diccionario inglés-español Tecnología Nuclear*. Foro nuclear. Format digital

